

**YILDIZ TEKNİK ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ**

79126

**STEP MOTOR KULLANILARAK PLOTTER
UYGULAMASININ GERÇEKLEŞTİRİLMESİ**

Elek. Müh. Haluk GÖRGÜN

F.B.E. Elektrik Mühendisliği Ana Bilim Dalı Elektrik Mühendisliği Programında Hazırlanan

YÜKSEK LİSANS TEZİ

Tez Danışmanı : Yrd. Doç. Dr. İbrahim ŞENOL

79126

15.07.1998

İbrahim ŞENOL
İbrahim

Olcay Kınay
Ölmez
İSTANBUL, 1998

Doç. Dr. Nurettin UMURKAN

Umurkan

TC. YÜKSEKÖĞRETİM KURULU
DOĞRULAMA

İÇİNDEKİLER

Sayfa

SİMGE LİSTESİ	iv
ŞEKİL LİSTESİ	v
ÇİZELGE LİSTESİ	vii
ÖZET	viii
ABSTRACT	ix
1. GİRİŞ.....	1
2. STEP MOTORLAR.....	2
2.1. Step Motorların Tanımı, Sınıflandırılması, Kullanım Alanları ve Avantajları.....	2
2.2. Step Motor Çeşitleri.....	5
2.2.1. Değişken relüktanslı step motor.....	5
2.2.2. Sabit mıknatıslı step motor.....	17
2.2.3. Hibrid step motor.....	21
3. STEP MOTORLARA AİT ÖNEMLİ BÜYÜKLÜKLER.....	27
3.1. Çözünürlük.....	27
3.2. Doğruluk.....	27
3.3. Tutma Momenti.....	28
3.4. Tek Adım Cevabı.....	30
3.5. Sürekli Rejim Maksimum Yük Momenti Eğrisi.....	32
3.6. Kalkışta Maksimum Yük Momenti Eğrisi.....	34
4. ELEKTROMANYETİK TEORİSİ, STEP MOTORLARIN YAPILARI VE MOMENT ÜRETMELERİ.....	36
4.1. Değişken Relüktanslı Step Motorlarda Statik Moment Oluşum.....	36
4.1.1. Sonsuz manyetik geçirgenlik durumu.....	36
4.1.2. Sabit manyetik geçirgenlik durumu.....	42
4.1.3. Manyetik doyuma ulaşma durumu.....	44
4.2. Hibrid Step Motorlarda Moment Üretilmesi.....	46
4.2.1. Analitik yaklaşım.....	47
4.2.2. Moment üretiminde sürekli mıknatısın etkisi.....	48
4.2.3. Sabit moment.....	50
4.3. Dış Yapısı, Sayısı ve Kutup Düzeni.....	51
4.3.1. Dış yapısı.....	52
4.3.2. Faz, dış ve adım sayısı ilişkileri.....	54

5.	STEP MOTORUN SÜRÜLÜŞÜ.....	57
5.1.	Tek Yönlü Sürüş.....	58
5.2.	Çift Yönlü Sürüş.....	59
5.3.	R/L Sürüşü.....	61
5.4.	Çift Seviyeli Sürüş.....	62
5.5.	Kıyıcı Regüleli Sürüş.....	62
6.	YAPILAN UYGULAMA İÇİN KARTEZYEN KOORDİNATLAR MOTOR AÇISI DÖNÜŞÜM FORMÜLLERİ.....	64
6.1.	Giriş.....	64
6.2.	Motor Açılarında Kartezyen Koordinatlara Dönüşüm.....	64
6.3.	Kartezyen Koordinatlardan Motor Açılara Dönüşüm.....	65
6.4.	Sonuç.....	67
7.	PLOTTER KONTROL PROGRAMININ ÇALIŞMASI.....	69
7.1.	Giriş	68
7.2.	Kontrol Programı Menüleri.....	68
7.2.1.	Kontrol menüsü.....	68
7.2.2.	[Go START POINT].....	69
7.2.3.	[<<A].....	69
7.2.4.	[A>>].....	69
7.2.5.	[<<B].....	69
7.2.6.	[B>>].....	69
7.2.7.	[TRACE].....	69
7.2.8.	[POWER].....	69
7.2.9.	[GO DEG].....	70
7.2.10.	[GO ABS].....	70
7.2.11.	[SETUP].....	70
7.2.12.	[ABOUT].....	71
7.2.13.	[EXIT].....	72
7.3.	Durum Satırındaki Değerler.....	72
8.	YAPILAN UYGULAMANIN YAZILIMI.....	73
8.1.	Delphi Project	73
8.2.	Main Pas.	73
8.2.1.	About pas	89
8.2.2.	Cooread pas.....	91
8.2.3.	Stp pas.....	92
9.	SONUÇLAR.....	96
	KAYNAKLAR	97
	EKLER	98
	ÖZGEÇMİŞ	99

SİMGE LİSTESİ

A	Stator birinci fazı
B	Stator ikinci fazı
B	Manyetik Akı (T)
B_g	Boşluktaki manyetik Akı (T)
d	Diş derinliği (m)
f	Kuvvet (N)
g	Hava boşluğu genişliği (m)
H	Manyetik alan (A/m)
i,I	Akım (A)
J	Yük momenti (kgm^2)
K_T	Moment sabiti (Nm/Arad)
L	Endüktans (H)
m	Faz sayısı
n	Sarım sayısı
N_r	Rotor diş sayısı
N_s	Stator diş sayısı
p	Kutup çifti sayısı
q	Faz başına diş sayısı
r,R	Direnç (Ω)
S1,..S4	Anahtarlar
T	Moment (Nm)
T_A^+	A fazı pozitif uyarılma tutma momenti (Nm)
T_A^-	A fazı negatif uyarılma tutma momenti (Nm)
T_B^+	B fazı pozitif uyarılma tutma momenti (Nm)
T_B^-	B fazı negatif uyarılma tutma momenti (Nm)
T1,..T8	Transistörler
t	Zaman (sn)
v,V	Gerilim (V)
w	Diş genişliği
W_m	manyetik enerji (J)
x	alınan yol (m)
α	Zaman sabiti (s)
β	Zaman sabiti (s)
θ, Θ	Dönüş açısı (rad)
λ	Diş yolu (rad)
μ	Manyetik geçirgenlik (H/m)
ξ	Elektriksel olarak dönüş açısı (rad)
ρ	Moment açısı (rad)
τ	Moment (Nm)
ϕ, Φ	Manyetik akı (Tm^2)
ψ, Ψ	Kaçak akı (Tm^2)
ω, Ω	Açısal hız 1/rad.sn)
ω_n	Doğal frekans (1/sn)

ŞEKİL LİSTESİ

Sayfa

Şekil 2.1.	İki fazlı step motorun birinci fazının enerjilendirilmesi ile oluşan manyetik alan	5
Şekil 2.2.	İki fazlı step motorun ikinci fazının enerjilendirilmesi ile oluşan manyetik alan	6
Şekil 2.3.	İki fazlı step motorun iki fazının da enerjilendirilmesi ile oluşan manyetik alan	7
Şekil 2.4.	İki fazlı step motorun iki fazının enerjilendirilmesi ile rotorun konumu	7
Şekil 2.5.	İki fazlı step motorun tutma momentinin rotor pozisyonuna göre değişimi	9
Şekil 2.6.	İki fazlı step motorun fazların ters olarak enerjilendirilmesi	10
Şekil 2.7.	İki fazlı step motorun fazlarının sıra ile enerjilendirilmesinde statorun alacağı konumlar	11
Şekil 2.8.	İki fazlı step motorun yarım adım çalışması durumunda birinci adım	13
Şekil 2.9.	İki fazlı step motorun yarım adım çalışması durumunda ikinci adım	13
Şekil 2.10.	İki fazlı step motorun yarım adım çalışması durumunda üçüncü adım	14
Şekil 2.11.	İki fazlı step motorun yarım adım çalışması durumunda ilk 8 adımdaki rotor konumları	15
Şekil 2.12.	İki fazlı sabit mıknatıslı step motor	17
Şekil 2.13.	İki fazlı sabit mıknatıslı step motorda rotorun iki aynı stator kutbu arasındaki konumu	18
Şekil 2.14.	İki fazlı sabit mıknatıslı step motorda senkronlama momentinin rotor pozisyonuna göre değişimi	19
Şekil 2.15.	İki fazlı sabit mıknatıslı step motorda uygulanan momentin rotor Pozisyonuna göre değişimi	20
Şekil 2.16.	İki fazlı sabit mıknatıslı step motorda momentlerin rotor Pozisyonuna göre değişimleri	20
Şekil 2.17.	İki fazlı hibrid step motorun stator ve rotoru	22
Şekil 2.18.	İki fazlı hibrid step motorun rotor kesiti	22
Şekil 2.19.	Statoru ve rotoru çok dişli hibrid step motor	24
Şekil 2.20.	Hibrid tip step motor rotoru	25
Şekil 2.21.	Hibrid tip step motor statoru	25
Şekil 3.1.	Faz akımının çeşitli değerleri için tutma momenti/rotor konumu eğrileri	28
Şekil 3.2.	Hibrid motorun tutma momenti/rotor konumu eğrileri	29
Şekil 3.3.	Step motorun tek adım cevabı	30
Şekil 3.4.	Doğal frekansa yakın hızlarda step motorun davranışı	32
Şekil 3.5.	Sürekli rejimde maksimum yük momenti/hız eğrisi	33
Şekil 3.6.	Sürekli rejimde maksimum yük momenti ve kalkışta maksimum yük momenti eğrileri	35
Şekil 4.1.	Elektromanyetik alan içindeki demir parçası	36
Şekil 4.2.	Step motor prensibinin açıklanabileceği basit bir model	37
Şekil 4.3.	Kaplanmış alan	39

Şekil 4.4.	Δt süresinde rotor dişinin manyetik alan tarafından Δx kadarlık hareketi	40
Şekil 4.5.	Sistemin manyetik enerji ve koenerji dağılımı	46
Şekil 4.6.	İki fazlı hibrid step motor modeli	47
Şekil 4.7.	Rotorda ve statorda aynı sayıda diş bulunan yapı	52
Şekil 4.8.	Rotorda ve statorda farklı sayıda diş bulunan yapı	52
Şekil 4.9.	Bir hibrid tip step motorun diş yapısı	53
Şekil 5.1.	Tipik bir step motor sürüş sisteminin şematik düzenlemesi	57
Şekil 5.2.	Step motor tek yönlü tipik sürüş düzeni	58
Şekil 5.3.	İki fazlı step motor için tipik iki yönlü sürüş düzeni	59
Şekil 5.4.	Tek veya çift yönlü sürüşlerin step motorun stator sargı bağlantıları ile bağlanabilme düzeni	60
Şekil 5.5.	R/L sürüşünde stator sargılarının ortak hattına seri olacak uygun dirençlerin bağlanması	61
Şekil 5.6.	Değişik gerilim değerlerindeki endüktif devredeki akım-zaman değişimi	62
Şekil 5.7.	Kıyıcı regüleli sürüşte akım ve gerilimin zamana göre değişimi	63
Şekil 6.1.	Plotter'ın iki segmentinin kartezyen koordinatlarda sembolik gösterimi	64
Şekil 6.2.	Aynı noktada plotter'ın iki farklı durumu	66

ÇİZELGE LİSTESİ

	Sayfa
Çizelge 2.1. 1. adımdan 5. adıma kadar stator sargılarının anahtarlama sırası	12
Çizelge 2.2. Yarım modda çalışma için anahtarlama sıraları	16



ÖZET

Step motorlar konum hassaslığı gerektiren uygulamalarda en çok kullanılan motorlardır. Kontrol edilebilme kolaylığı, doğrudan dijital işaretler ile çalışabilmesi ve bir çok uygulamada kapalı çevrim kontrol düzeneğine ihtiyaç duymaması nedeniyle tercih edilirler. Bu çalışmada iki adet hibrid tip step motor kullanarak plotter uygulaması gerçekleştirilmiştir. Aslen bu çalışma bir robot kol uygulamasının temelini teşkil etmektedir ve geliştirilmeye çok elverişlidir.

Çalışmada öncelikle step motorların genel yapıları, karakteristik özellikleri, uygulama alanları ve avantajları anlatıldıktan sonra step motorlara ait önemli büyüklükler açıklanmıştır. Dördüncü bölümde elektromanyetik teori ve step motorlarda moment oluşumu incelenmiştir. Beşinci bölümde step motorların sürücü sistemleri üzerinde durulduktan sonra altıncı bölümde yapılan uygulamada kullanılan kartezyen koordinat sistemi motor açıları dönüşüm formülleri açıklanmıştır. Yedinci bölümde yapılan uygulamanın bilgisayar tarafından kontrolünü kolaylaştıran programın çalışması anlatılmıştır. Sekizinci bölümde ise yapılan uygulamanın yazılımı verilmiştir. Ekler kısmında da yapılan uygulamada kullanılan step motor sürücü devresi verilmiştir.

Sonuçlar kısmında, yapılan çalışmanın çok amaçlı olarak kullanılabilmesi ve bir çok uygulamaya temel teşkil edecek şekilde geliştirilebileceği belirtilmiştir. Ayrıca bu tür çalışmalarda step motor kullanılmasının avantajları üzerinde durulmuştur. Alternatif olarak diğer küçük güçlü elektrik motorlarının da kullanılabilmesi ifade edilmiştir.

ABSTRACT

Stepping motors are widely used in position accuracy required systems. Since they are easily controlled, they can run directly with digital sign, and not need closed loop control in application, they are preferred. In this work, plotter application is done with two hybrid type stepping motors. In fact, this work can be accounted main part of the robotics and available for many advance study.

In this study, firstly general structure of stepping motors, their characteristics, application field and advantages are presented and then, important facilities of stepping motors are explained. In the forth chapter, electromagnetic theory and torque production is analyzed. In the fifth chapter, fundamental principles of driving or controlling a step motor are discussed after that transformation formula is explained in the chapter six. In the seventh chapter, running of the program which is made to make control of system easily is accounted for. Finally software of this study is presented. Used driver systems of stepping motors is given in appendix 1.

In the final result part of the thesis, it is explained that the study can be used multipurpose. Also advantages of using stepping motors in this kind of application pointed out. Beside that availability of using alternative small motors is made clear.

1. GİRİŞ

Step motorlar, günümüzde elektrik, elektronik ve otomasyon mühendisliği alanlarında yapılan çalışmalarda yer alan tahrik ve pozisyon denetimi konularında en çok tercih edilen elektrik motoru türü olarak göze çarpmaktadır.

Step motor bir dalga katarını alıp bunu miline dönüş açısı şeklinde yansıtan bir motordur. Bu dalga katarı genellikle bir elektronik devre veya bilgisayar tarafından kontrol edilir. Bu motorlar dijital sistemlerle son derece uyumludur. Motor milinin atacağı adım sayısı dalga katarındaki adım sayısı ile orantılıdır. Bunun için bu motorları kontrol ederken herhangi bir geri besleme cihazı ve düzeni kullanmaya gerek yoktur.

Bu motorlara yapılan konstrüksiyonlar basittir ve görelî olarak ucuzlardır. Sürücü devreleri çok az sayıda komponent içerir. Çoğunlukla XY çiziciler, yazıcılar, uydu anten yön kontrolü, disket sürücüler, robotlar, nümerik kontrollü tezgahlar, ölçü aletlerinde kağıt sürme düzenleri gibi uygulamalarda yerini almıştır.

Çoğunlukla 1W ile 3HP güç aralığında üretilirler. Adım açıları 0.78 dereceden 90 dereceye kadar değişmekle beraber sıkça kullanılan açılar 1.8, 7.5, 15 derecedir. Step motorlar; Sürekli mıknatıslı, Değişken relüktanslı ve Hibrid tip olmak üzere üç farklı sınıfta incelenebilir. Bundan sonraki bölümde step motor çeşitleri, bunların yapıları karakteristik özellikleri, uygulama alanları ve avantajları üzerinde ayrıntılı olarak durulmuştur.

2. STEP MOTORLAR

Step motor, diğer geleneksel elektrik motorlarından oldukça farklı adından da anlaşılacağı gibi hareketini adım adım yapabilen bir elektrik motorudur. Bu sebepten konum ve pozisyon kontrollerinin çok hassas olması gereken yerlerde vazgeçilemez bir motor tipi olarak diğer elektrik motorlarının önünde yer almaktadır. Asenkron motorlar ile karakteristik yönünden tamamen farklı olan step motor, DC motorlar ile bazı yönlerden aynı özelliklere sahiptir. Step motorlar bazı Türkçe literatürlerde adım motoru, yabancı literatürlerde de stepper veya stepping motor olarak da yer almaktadır.

Bu bölümde bu motorların tanımı, sınıflandırılması, kullanım alanları, avantajları ve günümüzde kullanılan en yaygın step motor çeşitlerine değinilmiştir.

2.1. Step Motorların Tanımı, Sınıflandırılması, Kullanım Alanları ve Avantajları

Step motor, sargılarının uygun kombinasyonda enerjilendirilmesi ile milinde dönüş açısı (adım hareketi) şeklindeki mekaniki güç dönüşümünü sağlayan bir elektrik makinasıdır.

1920'li yıllarda step motorun sürülüşü özel olarak geliştirilmiş el ile yönlendirilen bir düzen ile DC kaynaktan yapılmaktaydı. 60'lı yıllara gelindiğinde hızla gelişmekte olan dijital kontrol step motorların kontrol tekniklerini de değişime zorlamıştır. Yine bu tarihlerde değişken relüktanslı motorların yanı sıra rotorda kalıcı mıknatıslar kullanılarak gerçekleştirilen step motorlar da kullanılmaya başlanmıştır. Step motorların dizaynı ve kontrolündeki en hızlı gelişmeler ve yenilikler 70'li yıllarda meydana gelmiştir. Bu yıllarda dört fazlı 1.8° adım açılı, dört fazlı 2° , 2.5° ve 5° adım açılı hibrid motorlar, 7.5° adım açılı sabit mıknatıslı motorlar ve üç ve dört fazlı değişken relüktanslı motorlar üzerinde son derece etkili değişimler meydana gelmiştir. Günümüzde ise step motorun sürülüşü, elektronik bir devre, mikroişlemci veya bilgisayar tarafından yapılmaktadır.

Step motor dinamik açıdan incelendiğinde, her bir adımında mekaniki olarak bir denge noktasında olduğu görülmektedir. Motor, hareketinde kendisinin ve yükün atalet momentlerinin toplamı olan bir moment ile hareketi gerçekleştirir ve yeni bir denge

noktasına ulaşır. Başka bir deyişle “x” denge noktasından “x + adım açısı” olan yeni bir denge noktasına gelmiş olur. Motor bu hareketi sırasında boşta ise veya yük ataletinde bir düşüş meydana gelirse rotor yeni denge noktası civarında osilasyona girer. Bu olay yüksek hızlarda step motorun adım kaçırmasına veya stabil olmayan kontrol dışı hareket etmesine neden olur.

Uygulamalarda step motor kullanılırken motor sargılarının endüktansına ve momente dikkat edilmesi gerekir. Aşırı moment motorun kontrol dışı hareket etmesine neden olacağından moment değeri belirlenirken motorun maksimum momentinin %70’i ve hatta bu değerden biraz daha küçük bir moment değeri alınmalıdır.

Step motorlarda sınıflandırma, yapıları ve çalışma biçimleri bakımından yapılabilir. Aslında bir step motorun yapısı ve türü, motorun sargılarında enerji yok iken rotorun davranışı ile belirlenmektedir. Step motorlar, yapıları bakımından Değişken Relüktanslı ve Sabit Mıknatıslı Rotorlu olmak üzere iki ana gruba ayrılırlar. Ayrıca iki motor türünün de ortak özelliklerine sahip fakat kontrol açısından sabit mıknatıslı bir step motor olarak değerlendirilebilen üçüncü bir tip de Hibrid step motorlardır. Sabit mıknatıslı bir step motorda, stator sargılarında enerji yok iken, rotoru nominal moment veya daha küçük bir moment ile zorlandığında hareket etmez. Değişken relüktanslı step motorda ise rotor serbestçe hareket etmektedir.

Step motorlar bağlantı şekline göre de iki gruba ayrılırlar. Bunlar Unipolar (Tek Kutuplu) ve Bipolar (Çift Kutuplu) olarak isimlendirilirler. Unipolar step motorlar iki ana sargıya sahiptirler ve motordan altı uç dışarı çıkarılmıştır. Bunlardan dördü iki sargıya ait olan uçlardır. Diğer iki uç ise bu sargıların orta noktalarından alınmış olan uçlardır. Bipolar step motorlar da iki ana sargıya sahiptir ama dışarıya dört uç yani sadece faz sargılarının uçları çıkartılmıştır.

Step motorlar genellikle hassas konum kontrolünün gerektiği yerlerde kullanılmaktadır. Robot uygulamalarında, servo sistemlerde, xy koordinat işaretleyicilerinde, 3 eksen tarafından hareket eden nümerik kontrollü torna tezgahlarında, floppy disk sürücülerinde, şerit sürücü, şerit okuyucu ve şerit iz kontrol edicilerde, işaret basma makinalarında, uydu

antenlerinin yön kontrolünde, seri yazıcı, kelime işlem sistemlerinde, faks makinalarında, araba saatlerinde, ölçme aletlerinde kağıt sürme düzenlerinde, teleks makinalarında, imalat makinaların programlanmasında ve çeşitli uzay çalışmalarında step motor vazgeçilemez bir elektrik motoru olarak yerini almıştır.

Geleneksel elektrik motorlarına göre step motorlarının en önde gelen avantajları, sürücü devresinin maliyetinin düşük olması ve motorun oldukça küçük yapıya sahip olmasıdır. Diğer avantajları ise şöyle sıralayabiliriz:

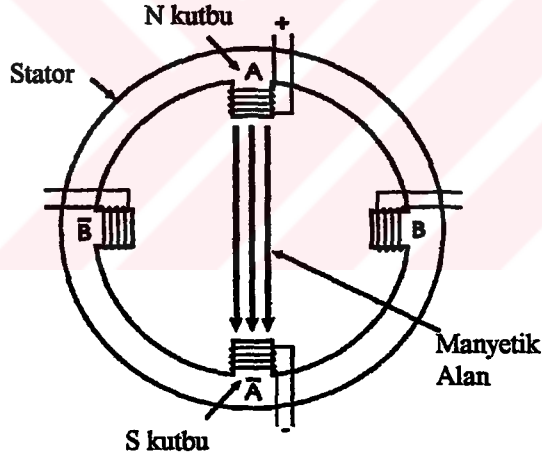
1. Veriler sayısal olarak ele alınmaktadır. Sayısal tüm devreler hem ucuz hem de çıkış hareketinin sayısal olması istenmesi halinde step motorları ideal bir çözümdür.
2. Ucuz mikroişlemci ile kontrol ve işlem rahatlıkla otomatize edilebilmektedir.
3. Bir açık çevrim sisteminde step motoru ile hız kontrolü ve doğru konuma ulaşmak mümkündür. Böylece alışılmış karasızlık problemleri önlenmiş olur.
4. Bir sabit mıknatıslı bir step motorda, aralıklı işlemlerde güç harcaması hareketsiz zaman sürecine indirgenir.
5. Adım motorlu kontrol sistemi için dizayn yöntemi son derece basit ve ucuzdur.

2.2. Step Motor Çeşitleri

2.2.1. Değişken relüktanslı step motor

Bu tip step motorda çalışma, stator ve rotor arasındaki hava aralığını minimum tutacak olan minimum relüktans durumlarının sağlanmasıyla makinanın stator ve rotorun dizaynına göre değişir.

Stator alanının uyarılması ile (bir manyetik alan oluşturabilmek için d.c. akım akıtılarak enerjilendirilmesi ile) rotor ileriye doğru çekilir ve sonra bu pozisyonlardan bir tanesine kilitlenir. Manyetik akı maksimum olarak akmaya başlayacaktır. Stator alan uyarılması stator alanını taşımak için değiştirildiğinde rotor minimum relüktansın yeni bir pozisyonuna taşınacaktır. Bu sefer step motor, açılabilir rotor pozisyonu veya uyarılabilir akımında yapılacak çoklu bir değişim ile dönen bir hız sağlanarak çalıştırılabilir.



Şekil 2.1 İki fazlı step motorun birinci fazının enerjilendirilmesi ile oluşan manyetik alan

Rotor ve stator yapıları genellikle şekillendirilmiş nüve saçlarından imal edilirler. Stator duran kutuplar üzerinde alan sargılarına sahiptir.

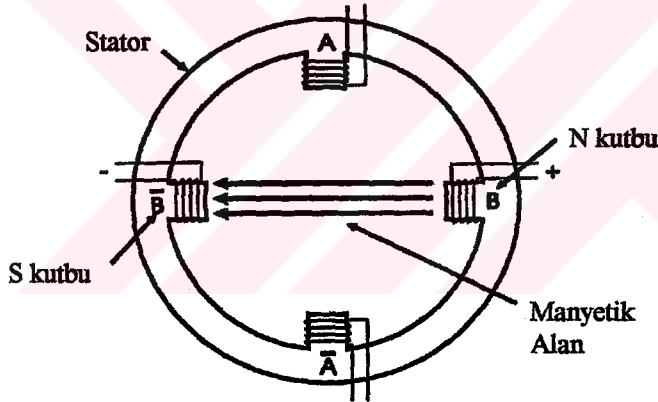
Şekil 2.1 de gösterildiği gibi statoru iki fazlı olarak göz önünde bulunduralım.

Stator üzerinde dağıtılmış elektriksel olarak izoleli sargılar (A sargısı ve B sargısı) bulunan dört sabit kutuplar ile yapraklı göbekli boyunduruktan oluşur.

Sargılar, doğru akım A sargısından geçtiğinde A kutbu bir N kutbu ve A- kutbu bir S kutbu oluşturacak şekilde düzenlenir ve manyetik alan gösterildiği gibi söylenebilir. Benzeri şekilde pozitif d.c. akım B sargısından geçtiğinde beklendiği gibi B ve B- de bir N ve S kutbu oluşturur.

Sargılarda ayrı ayrı veya beraber olarak akımı değiştirmek beklenen alanın polaritesini değiştirecektir.

D.C. akımın sadece B sargısından akıtılması ile oluşan manyetik alan Şekil 2.2 de gösterildiği gibidir.

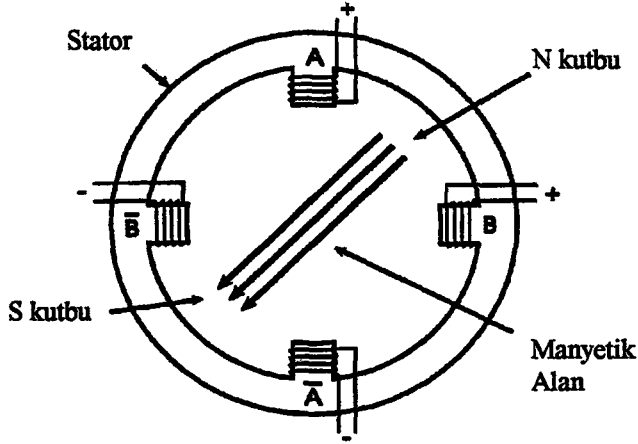


Şekil 2.2 İki fazlı step motorun ikinci fazının enerjilendirilmesi ile oluşan manyetik alan

Pozitif d.c. akımın aynı anda iki stator sargısından da (A ve B) akıtığımızda üretilen iki bağımsız manyetik alanlar karşılıklı olarak birbirini etkilerler ve birleşerek Şekil 2.3'de görüldüğü gibi tek bir sonuç alan meydana getirirler.

İki sargıdan da ayrı ayrı veya beraber hiç bir akım akıtılmadığında statorun merkezine yerleştirilmiş yumuşak demirli rotor harici bir güç uygulanmadığı sürece boşta kalacaktır.

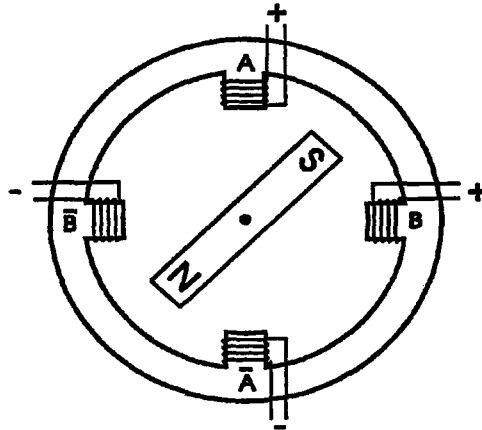
Çünkü rotor hiç bir doğal manyetik niteliğe sahip değildir ve sonuç olarak rotor ile uyarımsız stator arasında hiç bir karşılıklı etki oluşmayacaktır.



Şekil 2.3 İki fazlı step motorun iki fazında enerjilendirilmesi ile oluşan manyetik alan

Bununla beraber eğer pozitif d.c. akım A ve B sargularından akıtılırsa, üretilen sonuç manyetik alan (Şekil 2.3) rotorun endüklenmiş bir mıknatıs olmasına neden olacaktır. Rotor stator alan kutuplarına doğru farklı kutupların çekmesi aynı kutupların itmesi prensibinden dolayı etkilenecektir.

Kısa bir periyottan sonra (atalet, sürtünme ve osilasyon etkilerinden dolayı) rotor kendi kendine manyetik alanla Şekil 2.4 de gösterildiği gibi hiza alacaktır.



Şekil 2.4 İki fazlı step motorun iki fazının enerjilendirilmesi ile rotorun konumu

Şekil 2.4 de yumuşak demirli rotor üzerinde belirtilen N ve S kutupları stator alanından dolayı endüklenmiştir. Stator alanının polaritesi hemen rotor polaritesine karşı yönde olan kutupla bitişik hale gelir.

Bu durumda rotordaki tork sıfırdır. Rotor ve stator arasında bir manyetik kuvvet oluşur ama bu direkt olarak rotor ile aynı hizadadır ve dönen moment veya tork yoktur.

Uygun tork ve rotor kuvveti arasındaki bu ilişkiyi açıklayabilmek için manyetiki kuvveti, rotor ile statoru direkt olarak birleştiren gergin bir yay gibi düşünebiliriz. Yay kuvveti radyal olarak etkilemektedir ve rotoru durgun halinden harekete geçirecek kesin bir dönel kuvvet sağlamamaktadır. Bununla beraber eğer rotor harici bir kuvvetle sapıyorsa (yay yandan bir kuvvet sarf edecektir.) rotordaki bir tork veya dönen moment orijinal sapma kuvvetine ters yöndedir. Sapmadaki artış depolanan torkda bir artışa neden olacaktır.

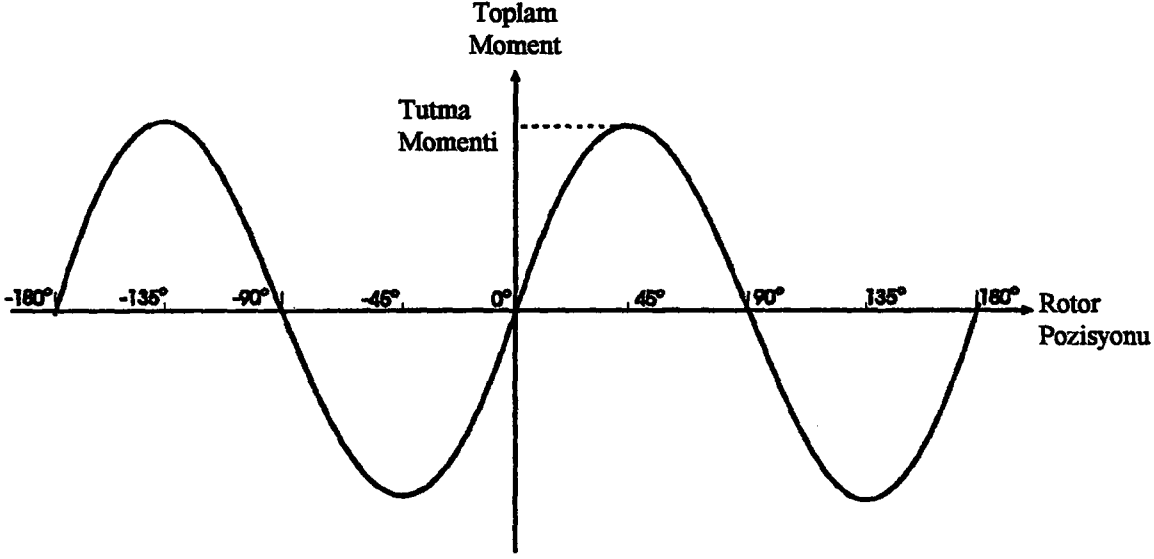
Rotoru etkileyen harici bir kuvvet, rotoru kuvvet ile aynı doğrultuda hareket ettirme eğilimi gösterecektir. Stator ve rotorun arasındaki kuvvetin büyüklüğü hava aralığının artmasından dolayı açılmal yer değişim ile azalacaktır. Bununla beraber orijinal pozisyona dönmeyi deneyen depolanmış bir tork ters yönde oluşabilir. Bu tork Relüktans Torku olarak isimlendirilir ve motorun değişken relüktansından dolayı ortaya çıkmıştır.

Şekil 2.5 iki fazlı bir sistem için rotor pozisyonuna karşı torkların toplamının karakteristiğini göstermektedir.

Kullanılan standart, eğer toplanılan tork rotoru saat yönünde döndürecek şekilde ise pozitif ve saat yönüne ters yön için negatiftir. Gösterilen tork rotoru pozisyonun dışına taşıyan harici kuvvetin torkudur ve bu tork rotorda kendi kendine oluşmaz. Rotor torkuda aynı genlikte olacaktır fakat ters polaritede.

Pozitif rotor sapmasıyla (saat yönünde) torkun pozitif olarak maksimum 45° ye kadar çıkıp sonra 90° ile sifira düşeceği görülebilir. Dalga şekli sinüzoidal olarak göz önüne alınabilir.

Tam karakteristiğın şekli aşağıdaki gibi açıklanabilir.



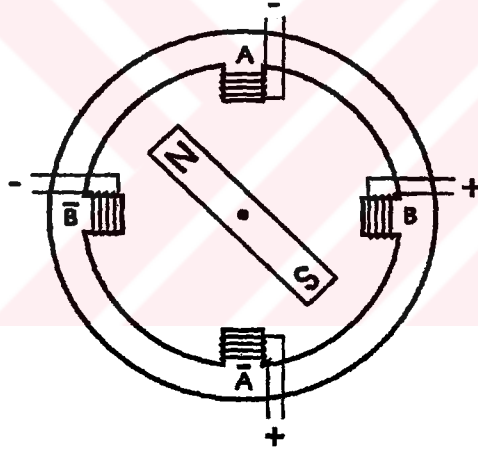
Şekil 2.5 İki fazlı step motorun tutma momentinin, rotor pozisyonuna göre değişimi

1. 0° 'de, rotor ile stator arasında sadece manyetik kuvvet mevcuttur. Tork yok.
2. 0° ile 45° arasında, roturu yer değiştirmek için ihtiyaç olunan tork maksimuma doğru artar.
3. 45° 'de, Artan tork maksimumdur ve Tutma torku olarak isimlendirilir. Bu değer üzerinde ilave edilen bir yük rotorun pozisyon dışına çıkmasına neden olur.
4. 45° ile 90° arasında, tork sıfıra doğru iner. Rotor ise tork diğer 90° de iptal olana kadar iki dengeli durum arasında eşit olarak etkilenir.
5. 90° ile 180° arasında, roturu sonraki dengeli pozisyonuna çekilmekten korumak için engellemek gerekir. Bu torkun negatif değeri içindir.
6. 135° 'de, rotor sonraki durgun pozisyona doğru etkinin maksimum kuvveti ile davranır. Aynı zamanda bu da Tutma Torkudur ve 45° 'dekine ters yöndedir.
7. 135° ile 180° arasında, tork sıfıra doğru azalır. Rotor ise sonraki dengeli durum ile hizalı hale gelir.
8. 180° 'de, rotor bir kez daha sonraki dengeli pozisyon içinde stator alanı ile hizalanır. Döndürülmüş rotorda endüklenen mıknatıslanmanın polaritesi ile hiç bir tork üretilmez.

Negatif rotor pozisyonları için karakteristiğın şekli, 0°den 180°ye, aynı şekilde açıklanabilir.

Tutma torkunun önemi bunun maksimum tork oluşu ve bu maksimum torkun uyarılmış stator ile sabit rotora uygulaması ve halen daha bu pozisyonun üzerinde kontrol kurulmasıdır. Eğer uygulanan yük tutma torku değerine eşit veya bu değerden büyük bir değer ise rotor yük tarafından sürülebilir veya senkronizasyon kaybolur. Eğer harici yük tutma torkunun değerini azaltsaydı, rotor ilk önce stator alanına doğru etkilenecek ve dengeli pozisyonlardan bir tanesinde tutulu kalacaktı.

Sonra, akımın polaritesi B sargısında aynı yani pozitif iken ama A sargısında akım ters olarak değiştirilmiş yani negatif iken durumu göz önüne alalım. Durum Şekil 2.6 daki gibidir.

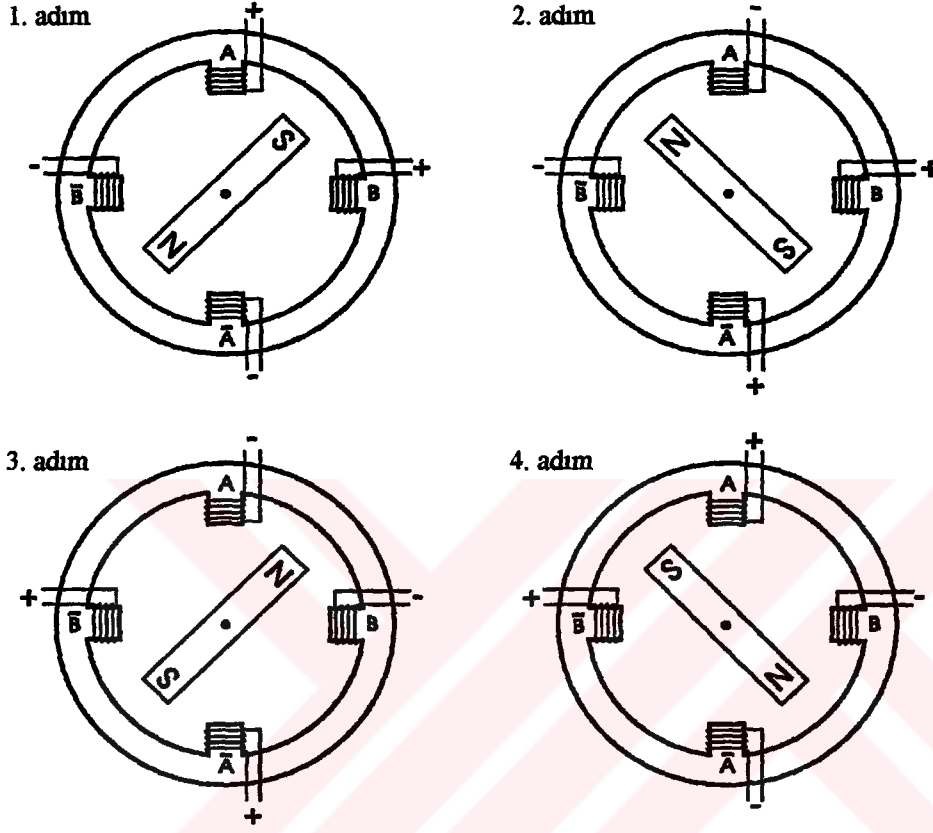


Şekil 2.6 İki fazlı step motorun fazların ters olarak enerjilendirilmesi

Rotor, stator sargı ve akımlarından oluşan sonuç manyetik alan ile hizalmıştır. Bu belirtiler gözlemciye rotorun 90°lik saat yönünde dönüşünü göstermektedir.

Şekil 2.7 stator sargılarından akıtılan akımın 4 durumu altında rotorun pozisyonunu göstermektedir.

1. ve 2. adımlar önceden tanımlanmış Şekil 2.5 ve 2.6'dır. 3. Ve 4. Adımlar sonraki durumlardır ve A ve B sargılarının bir kez daha değiştirilmesi ile oluşur. Her adımda rotor saat yönünde 90° ile ilerlemektedir.



Şekil 2.7 İki fazlı step motorun fazlarının sıra ile enerjilendirilmesinde statorun alacağı konumlar

Eğer 1. adım ve 4. adımlardan sonra tekrarlınsaydı (A ve B sargılarından pozitif akım akıtmak ile) rotor 1. adımda (Şekil 2.4 ve 2.7) gösterilen orijinal pozisyonuna gidecekti. Adımların tam sırası rotorda tamamlanmış tam bir devre (360°) sebep olmuştur.

Uyarma akımlarının dönüşlerinin sırasının aynı şekilde tekrarı rotora devam eden saat yönünde bir dönüş kazandıracaktır. Bu dönüş yapılan akım değişiklikleri ve hız akımlarının anahtarlama oranları ile yönetilmektedir.

Tanımlanmış sıralı anahtarlama, stator akımlarının stator sargılarına doğru eşli değiştirildiğinde, TAM ADIM işletme olarak isimlendirilir veya step motor TAM ADIM MOD' unda da çalıştırılıyor denir.

Ayrıca şu da göz önüne alınmalıdır. Bütün zamanlardaki her iki sarıdan da geçen akımlar her iki yön içinde aktılabilir. Buna ÇİFT FAZ UYARMA adı verilir ve yüksek güç performansı istenilen yerlerde yaygın olan step motor uyarma tipidir.

Çizelge2.1., 1.adımdan 5.adıma kadar akımın anahtarlama sırasını göstermektedir. 5.adım aslında 1.adımın tekrarıdır.

Çizelge 2.1. 1. Adımdan 5. Adıma kadar stator sargılarının anahtarlama sırası

Adım	İleri Sıra	Ters Sıra
1.adım	$\bar{A} B$	$\bar{A} B$
2.adım	$A B$	$\bar{A} \bar{B}$
3.adım	$A \bar{B}$	$A \bar{B}$
4.adım	$\bar{A} \bar{B}$	$A B$
5.(1.)adım	$\bar{A} B$	$\bar{A} B$

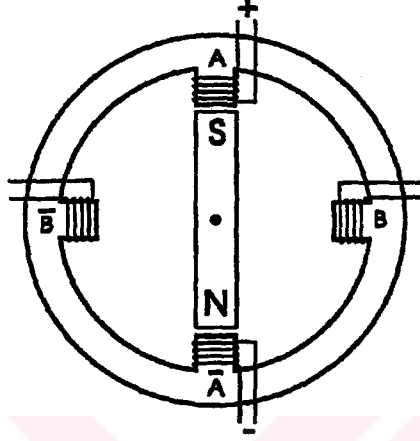
Bundan dolayı, eğer sargılardan geçirilen akımlar tabloda gösterilen ileri sırada ise rotorda aynı yönde dönecektir. İki fazlı stator için rotorun adım açısı her 5 adımda tam bir devri veren 90° olmalıdır. (Rotor pozisyonunda 4 değişiklik olmaktadır.)

Eğer ters sıra kullanıldı ise (aslında ileri sıradaki gibi aynı sayı ve akım durumlarına sahiptir ama bunlar ters sıradadır.) rotor ters yönde ama halen aynı adım açısı ve hızı ile hareket edecektir.

Tam adım modunda rotorun her adımda yaptığı açı ADIM AÇISI diye adlandırılır. Minimum adım açısı faz sayısının ve/veya stator kutup sayısının artırılması ile sağlanabilir.

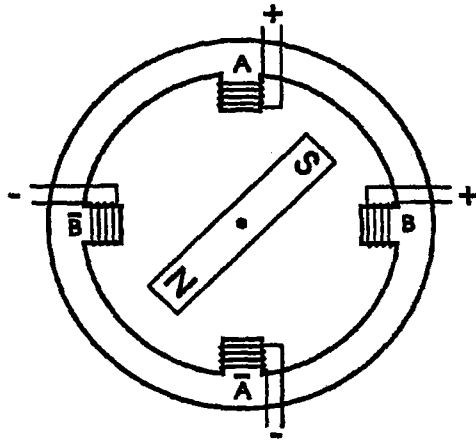
Step motorda pozisyonel çözümün daha da iyileştirilmesi YARIM ADIM MOD' unda çalışma ile sağlanabilir.

İlgilenilen durum Şekil 2.8 de gösterilmiştir.



Şekil 2.8 İki fazlı step motorun yarım adım çalışması durumunda birinci adım

Rotor önceden verilmiş olan aynı prensip ile A sargısından geçen pozitif d.c. akımın oluşturduğu alan ile kendi kendine hizalanmıştır. Bu sırada B sargısından hiç bir akım akıtılmamaktadır.

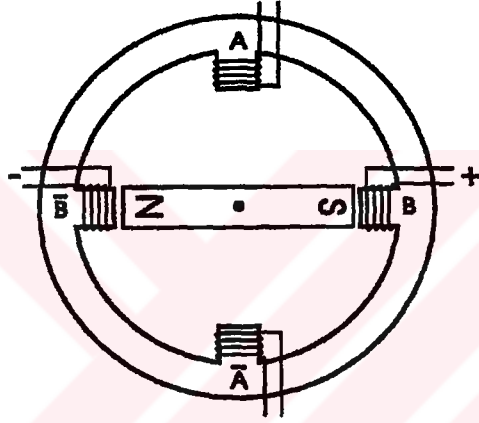


Şekil 2.9 İki fazlı step motorun yarım adım çalışması durumunda ikinci adım

A sargısındaki akım durumu devam ederken B sargısını da pozitif bir akım ile enerjilendirirsek rotor yeni bir manyetik alan ile hiza alacaktır. Bu şekil 2.9 da gösterilmiştir.

Etki rotorun önceki gibi saat yönünde dönüşüne neden olacaktır ama azaltılmış bir 45° lik adım açısı ile. (Tam adım işletme için 90° lik adım açısına karşılıktır.)

Akım dağılışındaki diğer bir değişiklik, B sargısındaki akım aynı iken A sargısındaki akımı sıfır yapmak, rotorun takip ettiği manyetik alanın biraz daha saat yönünde dönüşü ile yeni bir pozisyon almasına neden olur. Bu Şekil 2.10 da gösterilmiştir.

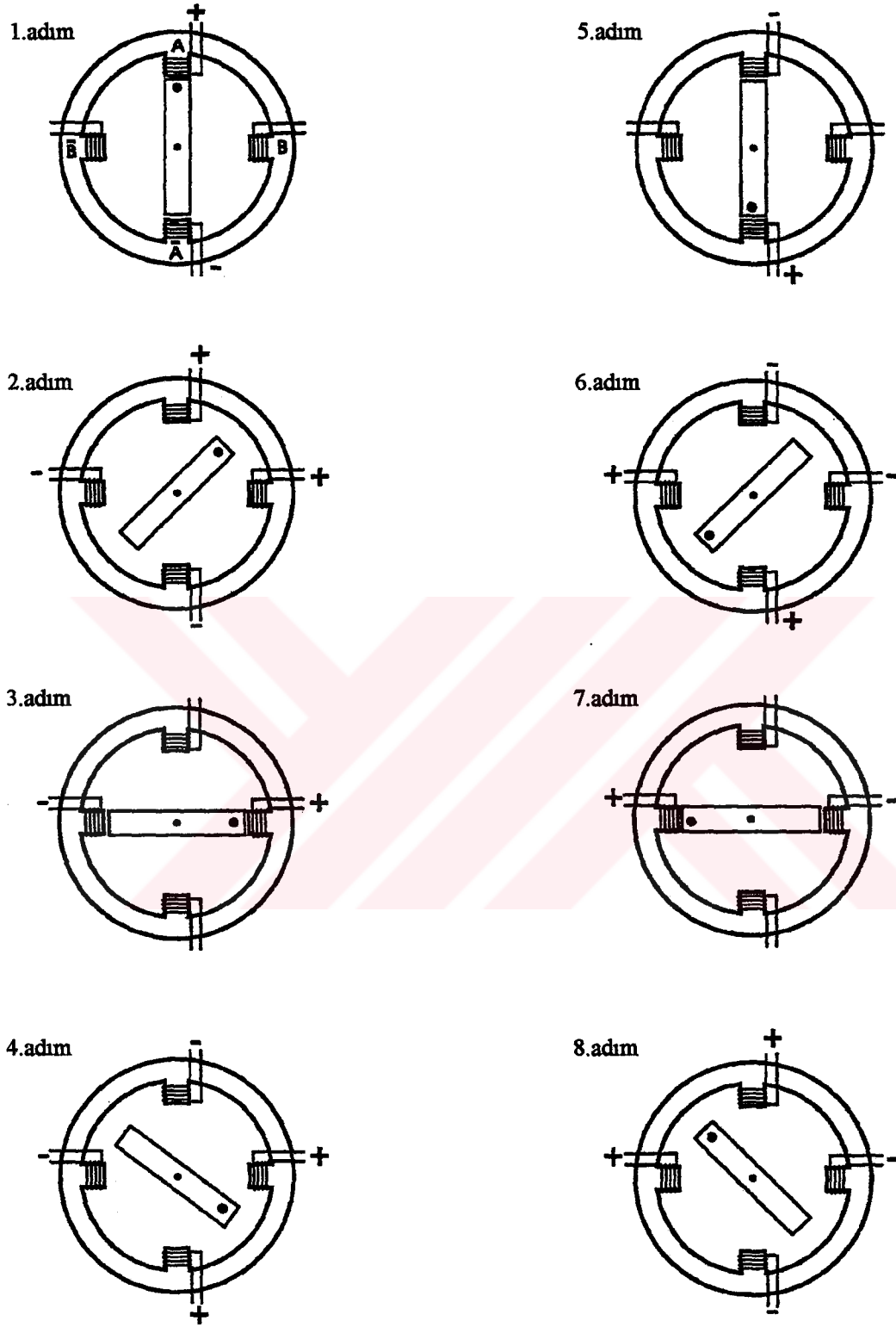


Şekil 2.10 İki fazlı step motorun yarım adım çalışması durumunda üçüncü adım

Yarım adım modda bir kez daha yapılan akım değişiminin etkisi rotorun 45° ile saat yönünde biraz daha dönüşüne neden olacaktır.

Şekil 2.11 muhtemel sekiz adımı, akımların akışını göstererek stator akım sırasında ve onların polaritelerini oluşturulan rotorun pozisyonu ile özetlemiştir. Sıradaki son adımın (9.adım) 1.adımın bir tekrarı olduğuna dikkat edilmelidir.

Böylece eğer stator akımının değişim sırası bu şekilde takip edilirse rotor 45° lik adımlar içinde 360° ile dönecektir. Benzeri olarak sırayı değiştirdiğimizde dönüş de ters yönde olacaktır ki bu yön saat yönüne ters olan yöndür.



Şekil 2.11. İki fazlı step motorun yarım adım çalışması durumunda ilk 8 adımda rotor konumları

Ayrıca eğer sıra periyodik olarak tekrarlanırsa rotor 360°'den fazla döndürülmüş olup devir üretilmeye başlanacaktır. Bir hızda sürekli bir dönüş, anahtarlama oranı ve ayrıca rotor ve statorun konstrüksiyonu ve dizaynı ile kontrol edilir.

Çizelge 2.2 yarım adım mod için anahtarlama sıralarını göstermektedir.

Çizelge 2.2. Yarım adım modda çalışma için anahtarlama sıraları

Adım	İleri Sıra	Ters Sıra
1.adım	$\bar{A} B$	$\bar{A} B$
2.adım	$- B$	$\bar{A} -$
3.adım	$A B$	$\bar{A} \bar{B}$
4.adım	$A -$	$- \bar{B}$
5.adım	$A \bar{B}$	$A \bar{B}$
6.adım	$- \bar{B}$	$A -$
7.adım	$\bar{A} \bar{B}$	$A B$
8.adım	$\bar{A} -$	$- B$
9.(1.)adım	$\bar{A} B$	$\bar{A} \bar{B}$

Tam adım modda olduğu gibi tablodaki son adım ilk adımla tamamıyla aynıdır ve sıranın değişimi rotorun dönüş yönünü değiştirecektir.

Çalıştırma bakımından adımların değişimi sırasında motor yarım adım modda çalıştırılırken sürenin yarısı için sargıların sadece birinden akım akıtılmaktadır. Bu ise TEK FAZLI UYARMA ile isimlendirilir ve bu step motoru besleyen elektriksel gücü sınırlar ve bundan elde edilen mekanik gücü azaltır. Bundan dolayı çalışma modunun seçimi (yarım veya tam adım) çıkış güç seviyesindeki azalma ile geliştirilmiş pozisyon seçimi için ihtiyacı dengelemeyi gerektirir.

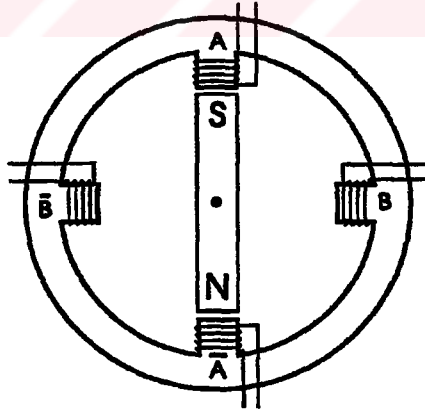
Değişken relüktanslı step motor küçük step açıları sağlayabilmek açısından uygundur genellikle sınır 1° 'den 60° 'ye kadardır. Onlar ayrıca düşük ataletle sahiptirler ve geçici durumlara çabuk cevap verirler. Yüksek adım oranlarında da çalışmaya elverişlidirler. Dezavantajları ise senkronlama torkunun olmayışı ve doğal sönümü olmayışı bundan dolayı da performansının osilasyon ve rezonansdan etkilenişidir.

2.2.2. Sabit mıknatıslı step motor

Sabit mıknatıslı step motor rotoruna yerleştirilmiş sabit bir mıknatısa sahiptir. Rotor torku iki etkinin kombinasyonudur.

- i. Manyetik kuvvet ve tork stator sargılarının uyarılmasından dolayıdır. Bu işlemler önceden anlatılmış olan değişken relüktanslı step motor ile aynıdır. Tek fark rotor sabit olarak mıknatıslanmıştır.
- ii. Stator ile rotor arasındaki manyetik kuvvetler /torklar statorun çıkıklığı ve rotordaki sabit mıknatıstan dolayıdır.

Şekil 2.12 de gösterilen iki fazlı sabit mıknatıslı step motora göz atalım.



Şekil 2.12 İki fazlı sabit mıknatıslı step motor

Rotorun N ve S kutupları rotorun yapısında varolduğundan dolayı hazırdirler.

Sargıların hiç birinden uyarma akımı akıtılmadığı halde rotor en yakın stator kutbu ile hizalı hale gelecektir (Burada A-A'). Rotorun herhangi kutbundan bir tanesi ile hizalı hale

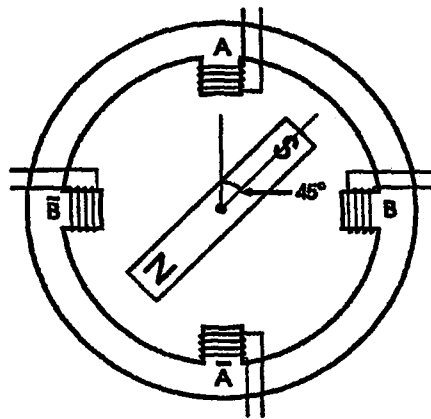
gelebileceği de bilinmelidir ve bu da ilk çevirmedeki veya bir önceki kullanımdan sonraki, rotorun serbest halde stator kutbuna en yakın olduğu yerdir. Hatta bu hizalama(kilitleme) yataklardaki sürtünme gibi içsel yükler veya herhangi bir harici yükün üstesinden gelmede uygun kuvvetlerdir.

Değişken relüktanslı step motor için verilen aynı sebepler için (etkinin manyetik kuvveti sadece stator ve rotor arasında mevcuttur) gösterilen pozisyonda rotorda hiç bir moment oluşmaz.

Eğer şu anda rotoru saat yönünde döndürmek amacıyla dışardan bir kuvvet rotora uygulanırsa, moment ortaya çıkar ve açısal yer değişim ile maksimuma çıkar. Bu ise Relüktans Momentidir.

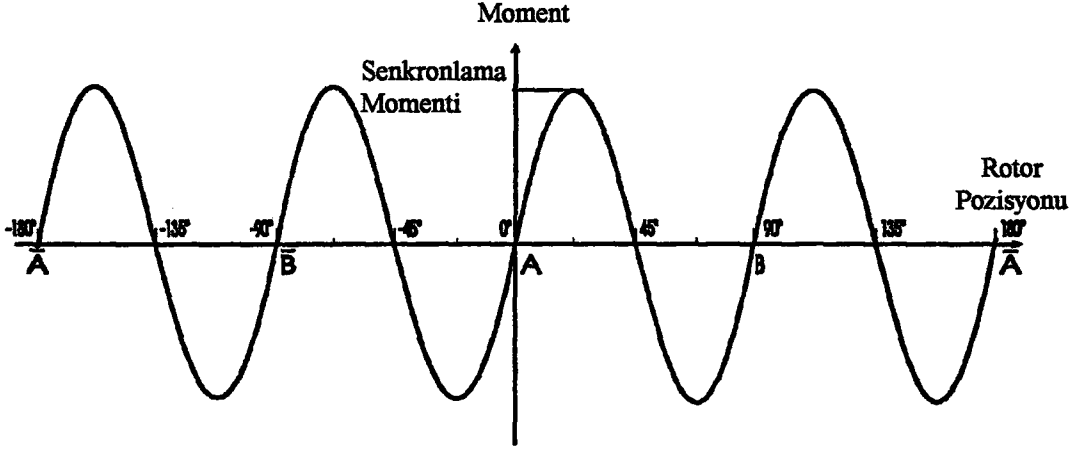
0 ile 45° arasında, üretilen moment sinüsoidal olarak $22,5^\circ$ 'de maximuma çıkar ve sonra 0° 'a iner.

Şekil 2.13'de gösterilen 45° lik yer değişimde rotor tam olarak iki stator kutbunun yarı yolundadır (ortasındadır.) İki kutba da olan etki eşit ama terstir ve oluşan net rotor momentini iptal eder.



Şekil 2.13 İki fazlı sabit mıknatıslı step motorda rotorun aynı iki stator kutbu arasındaki konumu 45° ile 90° arasında, rotor B kutbu ile hizalı halde kalabilmek için bir direnç göstermeyi talep eder. Böylece rotor tarafında üretilen moment açısal yer değişimin bu sınırlarında negatiftir.

Şekil 2.14 rotorun $\pm 180^\circ$ 'sini yani tam olarak 360° için rotora ters olarak uygulanmış moment karakteristiğini göstermektedir .



Şekil 2.14 İki fazlı sabit mıknatıslı step motorda senkronlama momentinin, rotor pozisyonuna göre değişimi

Uyarmsız durumdaki pozisyonda bir değişikliğe neden olmayan rotora uygulanmış maksimum momente senkronlama momenti (Bir mekanizmanın parçasını kilitleyen moment) adı verilir. Bu moment step motorun uygulamalarında önemli bir yer alır.

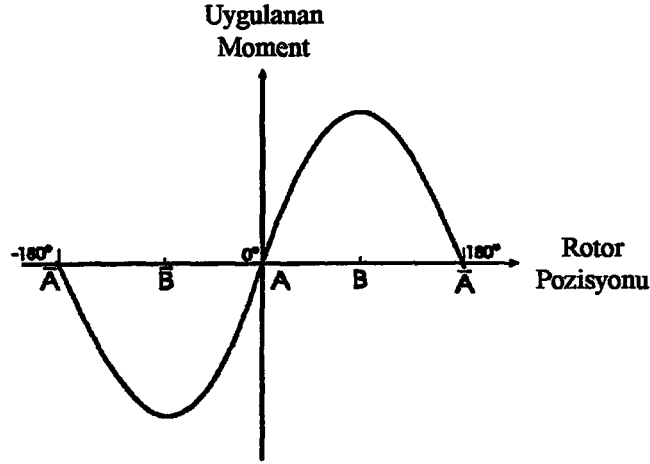
Eğer bir d.c. akım A sargısından şu anda akarsa, rotor oluşan manyetik alanla hizalanır. Bu ise Şekil 2.12 ' de gösterilen rotor pozisyonu ile aynıdır. Bu pozisyonda rotordaki N kutbu statordaki S kutbu ile karşılıklı olarak hizalanır.

Bu pozisyonda rotordan oluşan moment sıfırdır ve zaten aynı sebepler için daha önceden incelenmişti.

Eğer önceki gibi harici bir yük uygulanırsa, rotor kuvvet ile aynı yönde sapacaktır ve ters moment oluşur. Bu ise 'Uyarma Momenti' adını alır.

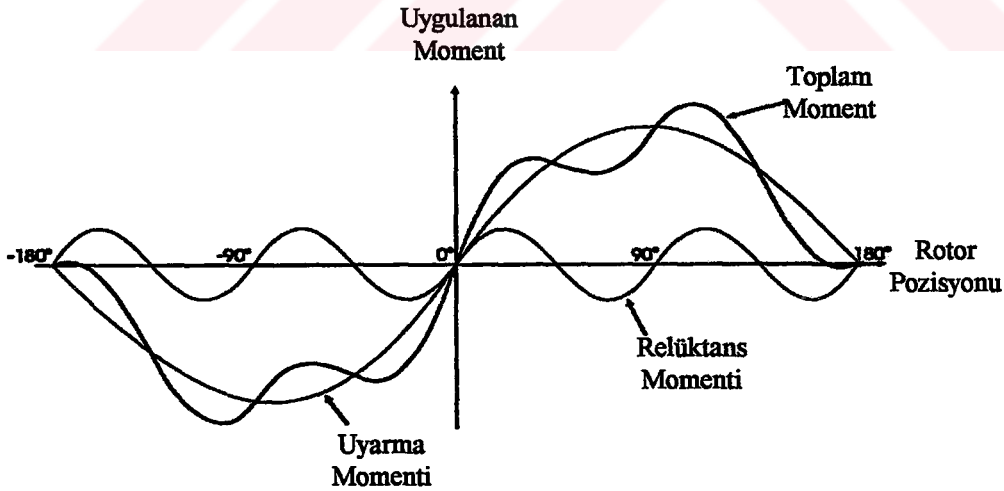
Rotor pozisyonuna karşı uygulanan momentin karakteristiği Şekil 2.15 'de verilmiştir .

0° ile 90° arasında , moment maximuma doğru pozitif olarak artar ve sonra 180° 'de sıfıra geri döner .



Şekil 2.15 İki fazlı sabit mıknatıslı step motorda uygulanan momentin, rotor pozisyonu göre değişimi

180° 'de (A^-) rotor momenti 0 olmasına rağmen bu oldukça kararsız bir durumdur (benzeri olarak manyetik kutupların itiş) ve uygulanmış kuvvet alındığında rotor hareket için zorlanmıştır. Şimdiye kadar relüktans momenti ve uyarma momenti ayrı ayrı gözden geçirildi. Pratikte her etkininde katkıda bulunduğu, rotorun oluşturduğu moment tek bir toplam momenttir.



Şekil 2.16 İki fazlı sabit mıknatıslı step motorda momentlerin, rotor pozisyonuna göre değişimleri

Şekil 2.16 sabit mıknatıslı step motorun birleştirilmiş relüktans ve uyarma momenti karakteristiklerini göstermektedir .

Çalışma bakımından sabit mıknatıslı step motor değişken relüktanslıdaki gibi stator uyarmasının değişimi ile cevap verir. Bu ise stator ve rotor arasında kurulan çekici ve itici manyetik kuvvetlerin kullanımı ile rotor kendisi hizalanır yani stator akımının değişimi ile ortaya çıkan stator alan pozisyonu değişimi ile Şekil 2.7 ve Şekil 2.11'e bakıldığında tam adım ve yarım adım modlarında her biri ayrı ayrı rotor pozisyonlarının tam sırası görülmektedir.

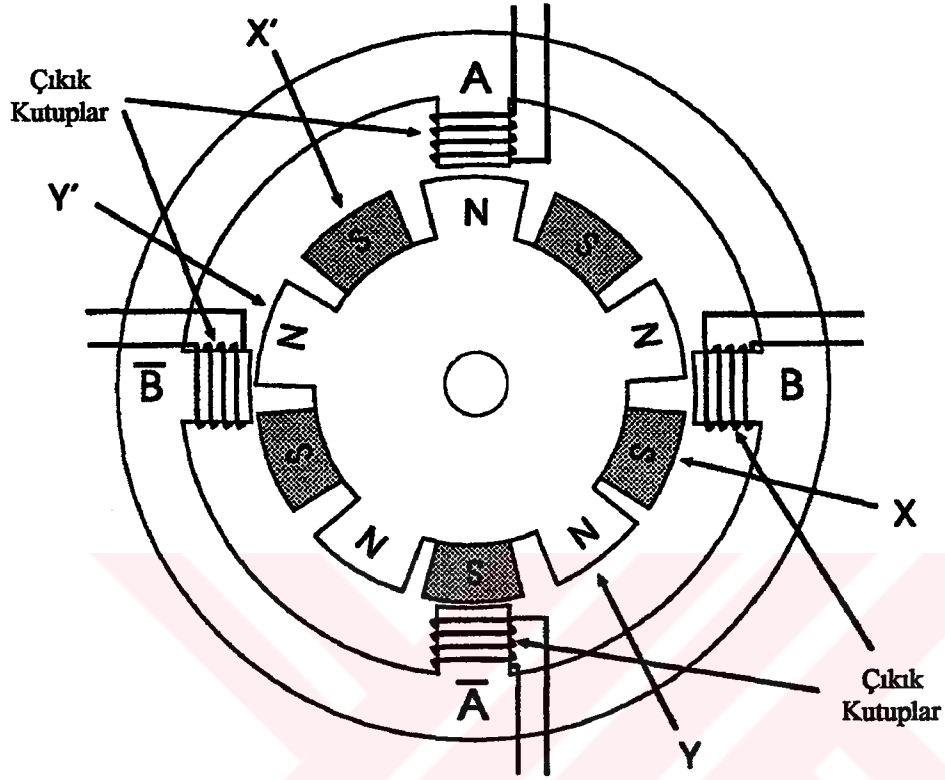
Sabit mıknatıslı step motorlar genellikle büyük adım açıları ile uygundur (tipik olarak 90° ve 120°) ve bu birçok uygulamalar için pozisyonel doğruluğu ciddi bir şekilde limitlemektedir. Onlar senkronlama momentine, iyi sönüm karakteristiğine ve eşdeğer bir değişken relüktanslı step motordan daha yüksek momente sahiptirler.

2.2.3. Hibrid Step Motor

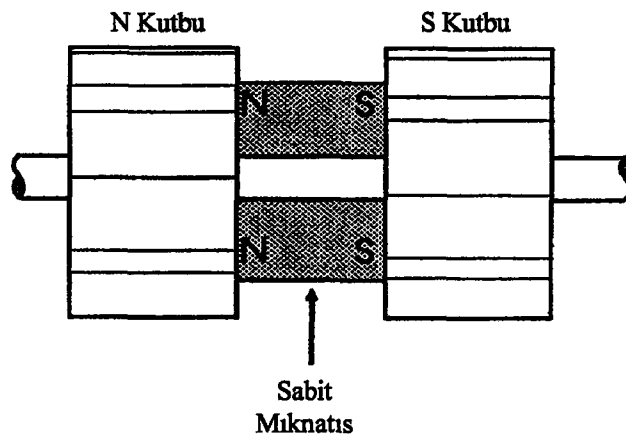
Hibrid step motorun rotoru daha önceden açıklanmış olan sabit mıknatıslı ile değişken relüktanslı tiplerin karakteristiklerinin birleşimi için yerleştirilmiş sabit bir mıknatıs ile şekillendirilmiş bir manyetik yola sahiptir.

Şekil 2.17 tipik bir iki fazlı Hibrid step motorun stator ve rotorunu göstermektedir.

Makinenin rotoru iki tane şekillendirilmiş yumuşak demirli kutup parçacıklarından oluşmaktadır. Her bir parçacık 5 dişli olup yarım dişlik bir derece ile kaydırılmıştır. Bir sabit kutupta bu parçacıklar arasına sıkıştırılmıştır. Bu Şekil 2.18 'de görülmektedir .



Şekil 2.17 İki fazlı hibrid step motor stator ve rotoru



Şekil 2.18 İki fazlı hibrid step motorun rotor kesiti

Her iki sargıdan da hiç bir akım akmadığında, rotor ve stator arasındaki paralel manyetik yollar yüzünden senkronlama momenti rotoru bir pozisyonda tutar.

Tam adım modunda A ve B sargılarından geçirilen pozitif d.c. akımlar sonuç olarak meydana gelen bir manyetik alan oluştururlar. Bu alan ise Şekil 2.17'de gösterilen pozisyonda rotoru tutan kuvvetleri güçlendirir.

Eğer B sargısındaki akım değiştirilmediği halde A sargısından geçen akım ters çevrilirse, stator alanı 90° ile saat yönünde ilerler. N ve S kutuplu rotor dişleri B ve A⁻ (Şekil 2.17 'de X ve Y) arasındaki yarı yolda yeni bir N kutbu pozisyonuna kurulur. S kutbu çekilirken N kutbu (Y) alan tarafından itilir. Benzeri olarak rotorun diğer tarafında olan X¹ ve Y¹ rotor dişleri itilir ve her biri ayrı ayrı yeni alana çekilirler.

Birleşmiş etki rotorun saat yönünde dişin derecesinin $\frac{1}{4}$ ' ü ile dönmesine neden olur. Yani $72^\circ/4$ veya 18° .

Tam adım modda iken stator uyarılmasında yapılan başarılı değişiklikler rotorun 18° 'lik adımlarla dönmesine neden olacaktır. Yarım adı çalışmada adım açısı 9° olacaktır.

Bilinen bir step motoru için adım açısı stator ve rotor dişlerinin derecelerinin farkından hesaplanabilir. Şekil 2.7 ve Şekil 2.8' de gösterilen stator ve rotor konfigürasyonuna sahip bir step motor için,

$$\text{Stator dişi derecesi} = 360^\circ / \text{Diş sayısı} = 360^\circ / 4 = 90^\circ$$

$$\text{Rotor dişi derecesi} = 360^\circ / \text{Diş sayısı} = 360^\circ / 5 = 72^\circ$$

$$\text{Adım açısı} = \text{Diş derecelerindeki fark} = 90^\circ - 72^\circ = 18^\circ$$

Böylece 4 stator kutbu ve 5 rotor kutbuna sahip bir step motorun minimum rotor pozisyonu 18° 'dir. Bu ayrıca rotorun tam adım modda her 20 darbeye ve yarım adım mod için 40 darbeye tam bir devre sahip olacağı anlamına gelmektedir.

Herhangi bir bilinen rotor pozisyonunda rotordaki moment, bir çift kutuptan daha fazla kutupların oluşturduğu hem uyarma ve hem de relüktans etkilerinin bir sonucu olan momenttir.

Step motorun pozisyon ihtiyacının artırılması için kutupların sayısının artırılması gerektiği açıktır. Açısal yönden daha fazla gelişme, pratikte makinalarda rotor üzerindeki dişli sayılarının artışı ile mümkün kılınabilmektedir.

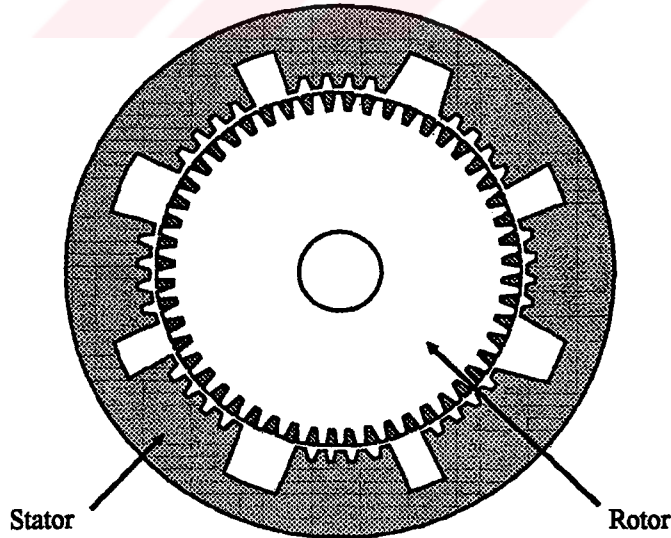
Şekil 2.19 rotor yüzeyleri bir çok dişe sahip olan endüstriyel bir hibrid step motor tipinin tipik bir stator/rotor düzenlemesini göstermektedir. Stator kutbu yüzeyleri de ayrıca eşit olmayan diş sayısına sahip olacak şekilde düzenlenmiştir.

50 stator dişi ve 40 rotor dişi ile basit adım açısı,

$$\text{Stator diş derecesi} = 360^\circ / 50 = 7.2^\circ$$

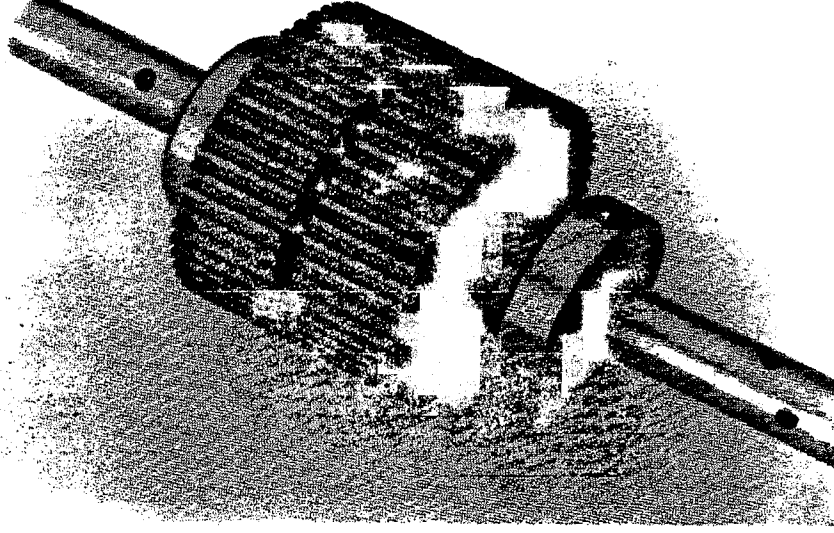
$$\text{Rotor diş derecesi} = 360^\circ / 40 = 9^\circ$$

$$\text{Adım açısı} = 9^\circ - 7.2^\circ = 1.8^\circ$$

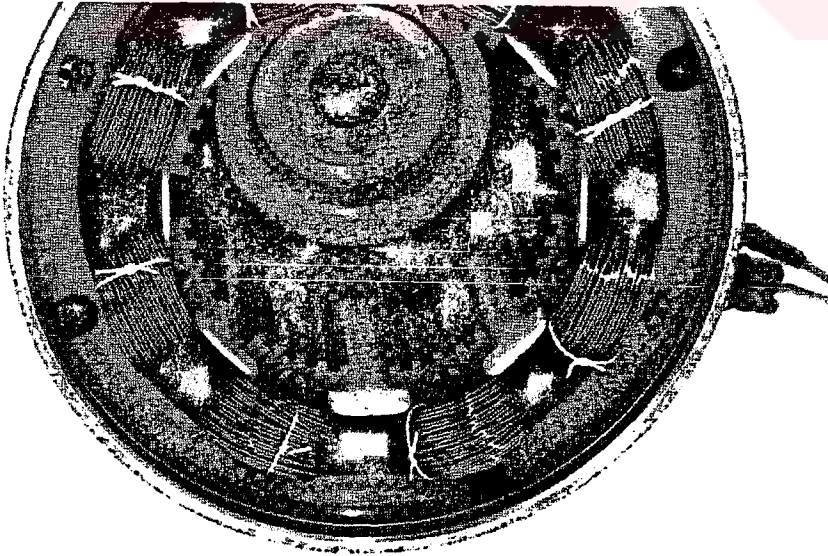


Şekil 2.19 Statoru ve rotoru çok dişli hibrid step motor

Bu step motorun adım açısı 1.8° ve 360° lik tam bir devri sağlayabilmek için 200 adıma tam adım modda veya 400 adıma yarım adım modda gereksinim duymaktadır.



Şekil 2.20. Hibrid tip step motor rotoru



Şekil 2.21. Hibrid tip step motor statoru

Genel olarak hibrid step motorları yaklaşık 5°'ye kadar küçük adım açıları sağlamaktadır. Bu yüzden onlar çok yüksek açısal kararlılığa ve senkronlama momentinin de sağlanması ile ilave bir avantaja sahiptirler. Benzer boyutlardaki değişken relüktanslı veya sabit mıknatıslı step motorlarla karşılaştırıldığında, hibrid step motor daha büyük senkronlama, tutma ve dinamik momente sahiptir. Ayrıca hızlı adımlama oranı ile çalıştırılma kabiliyetine de sahiptir.



3. STEP MOTORLARA AİT ÖNEMLİ BÜYÜKLÜKLER

Step motorlarını incelemeye başlamadan önce bu motorlara ait bazı davranış karakteristiklerini ve terminolojiyi incelemek yararlı olacaktır. Buna; step motorlara ait büyüklüklerin ve bunların ifadesinde kullanılan terimlerin klasik motorlara ait büyüklüklerden ve terimlerden farklı olması nedeniyle gerek duyulmuştur.

3.1. Çözünürlük

Çözünürlük, bir devirdeki adım sayısı veya dönen motorlar için adım açısı(derece), lineer motorlar için ise adım uzunluğu olarak tanımlanır. Sabit üretim sırasında tespit edilen bir büyüklüktür.

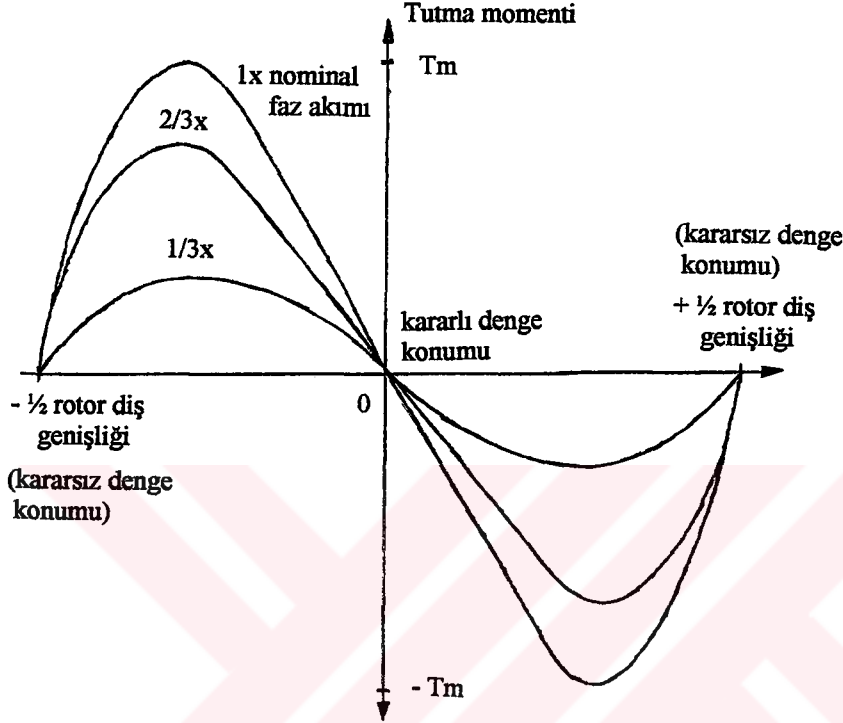
Bir step motorun adım büyüklüğü, çeşitli kontrol düzenleri ile değiştirilebilir. Yarım adım çalışmada adım büyüklüğü nominal değerinin(çözünürlüğünün) yarısına indirilir. Bu yöntem sırasıyla tek faz, iki faz, tek faz uyarımlarla uygulanabilir. Ayrıca motorun sahip olduğu faz sayısına göre yarım adım çalışma için değişik uyarma şekilleri saptanır. Bir diğer yöntem ise bir faz uyarılmış durumdayken diğer fazlardan akıtılacak akımların seviyelerinin kontrol edilmesiyle adım büyüklüğünün çeşitli değerlerde tutulmasıdır.

3.2. Doğruluk

Bir step motorun adım konumları, tasarım ve üretim sırasında bir araya getirilen bir çok parçanın boyutlarıyla belirlenir. Bu parçaların boyutlarındaki toleranslar ve dahili sürtünmeler adımların nominal denge konumlarında da toleranslara neden olurlar. Bu adım motoru doğruluğu isimlendirilir ve belli bir konumdaki maksimum açısal hatanın nominal tek adım değerinin yüzdesi olarak ifade edilmiş halidir. Örneğin, 24 adımlık bir step motorda maksimum ± 0.25 derecelik hata, $\pm \%1.67$ 'lik adım açısı hatasını karşılık düşer. Bu hata her yeni adımla artmaz. Bütün yük koşullarında oluşur ve sistematiktir. Klasik step motorlarda $\pm \%1$ ile $\pm \%5$ arasında değişmektedir. Sürtünme momenti veya kuvveti nedeniyle oluşan konum hataları bu doğrulukla ilgisi olmayan, daha az veya çok olabilen rasgele hatalardır. Ancak her iki tip hata toplanarak sistemin hatası elde edilir.

3.3 Tutma Momenti

Tutma momenti bir motorun en temel karakteristiğidir. Tutma momenti eğrisi motorun ürettiği tutma momentinin rotor konumuna göre değişimini veren eğridir. Şekil3.1'de örnek bir tutma momenti eğrisi görülmektedir.



Şekil 3.1 Faz akımının çeşitli değerleri için tutma momenti/rotor konumu eğrileri

Eğrinin orijini, motorun bir fazını uyarılmış olduğu durumda rotorun kararlı adım konumuna karşılık düşer. Bu eğri rotor adım pozisyonundan uzaklaştırılırsa motorda indüklenecek; rotoru, sıfır momentli adım pozisyonuna geri getirmeye çalışan momentin(tutma momenti) yönünü ve miktarını verir.

Tutma momenti eğrisi, motorun tüm rotor pozisyonları ve statik uyarma koşullarındaki ani momentini tam olarak tanımlamak için gereklidir. Tüm diğer moment karakteristikleri (statik veya dinamik) bu tutma momenti eğrisi baz alınarak elde edilebilirler.

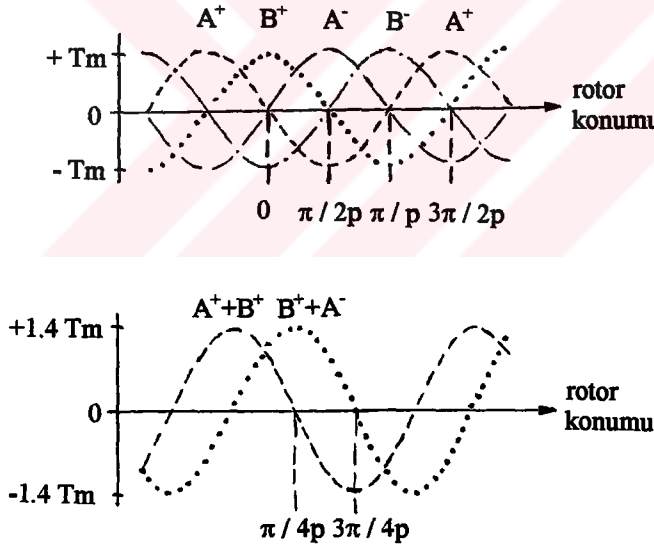
Statik moment/rotor pozisyonu karakteristiği, bir rotor diş genişliği periyoduyla tekrarlanır. Rotorun bir diş genişliği kadar yer değiştirmesi demek, stator ve rotor dişlerinin tekrar karşı karşıya gelmesi demektir. Yarım diş genişliği dönme konumunda rotor dişleri, stator

dişlerinin tam ortasında kalacağından kararsız denge konumu oluşur. Bu nedenle rotor ancak yarım diş genişliğinden az yer değiştirmiş ise gerçek adım pozisyonuna geri dönebilir. Daha büyük yer değiştirmelerde rotor ve stator dişleri istenen adım pozisyonundan bir veya bir kaç rotor diş genişliği uzaklıktaki kararlı denge konumunda karşılıklı gelebilirler. Tutma momenti eğrisinin genliği uyarma akımıyla yakın ilgilidir.

Bir motorun tüm fazlarına ait tutma momenti eğrileri birbirlerine göre faz farkları olan eğriler şeklinde aynı akım ekseninde gösterilirse, belli bir anda motor momentini arttırmak için iki veya daha fazın birlikte uyarılması gerektiği görülecektir. Şekil3.1.'de iki fazlı hibrid motorun tutma momenti eğrileri görülmektedir. Fazların pozitif ve negatif uyarılma durumları için tutma momenti ifadeleri;

$$T_{A^+} = -T_m \sin(p \theta) \quad (3.1.)$$

$$T_{A^-} = -T_m \sin(p \theta - \pi) \quad (3.2.)$$



Şekil 3.2. Hibrid motorun tutma momenti/rotor konumu eğrileri

(a) Tek fazlı uyarım durumu

(b) İki fazlı uyarım durumu

$$T_{B^+} = -T_m \sin(p \theta - \pi/2) \quad (3.3.)$$

$$T_{B^-} = -T_m \sin(p \theta - 3\pi/2) \quad (3.4.)$$

iki faz uyarılma durumunda ise,

$$\begin{aligned} T_A^+ T_B^+ = T_A^+ + T_B^+ = T_B^+ &= -2T_m \sin(p \theta - \pi/4) \cos(\pi/4) \\ &= -1.4 T_m \sin(p \theta - \pi/4) \end{aligned} \quad (3.5.)$$

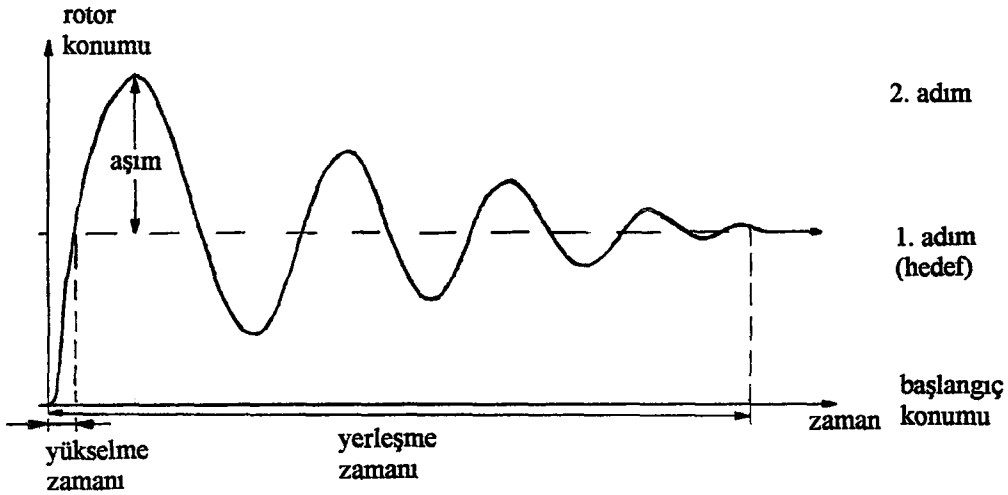
şeklinde elde edilir.

Görüldüğü gibi eğrinin genliği 1.4 katına çıkmıştır. Bu nedenle yüksek moment gerektiren uygulamalarda iki faz uyarma diye tanınan uyarma şekli kullanılarak motor çalıştırılır.

Tez çalışması, iki adet hibrid adım motoru üzerinde yapıldığından örnek olarak bu adım motoru alınmıştır. Daha çok sayıda faza sahip adım motorları için tutma momenti karakteristiğine göre daha çok sayıda faz aynı anda uyarılarak moment arttırılabilir.

3.4. Tek Adım Cevabı;

Motor fazlarından biri uyarılmış durumda ise, motor kararlı adım durumundadır. Bu fazın uyarılması kaldırılıp bir diğer faz uyarılırsa motor bir adım atacaktır. Rotor konumunun zamana göre bu değişimi tek adım cevabı olarak tanımlanır. Tek adım cevabı, motorun adım hareketinin hızını, cevabını aşım ve salınım miktarını, adım açısının hassaslığını veren önemli bir karakteristiktir. Şekil 3.3'de tipik bir tek adım cevabı görülmektedir.



Şekil 3.3. Step motorun tek adım cevabı

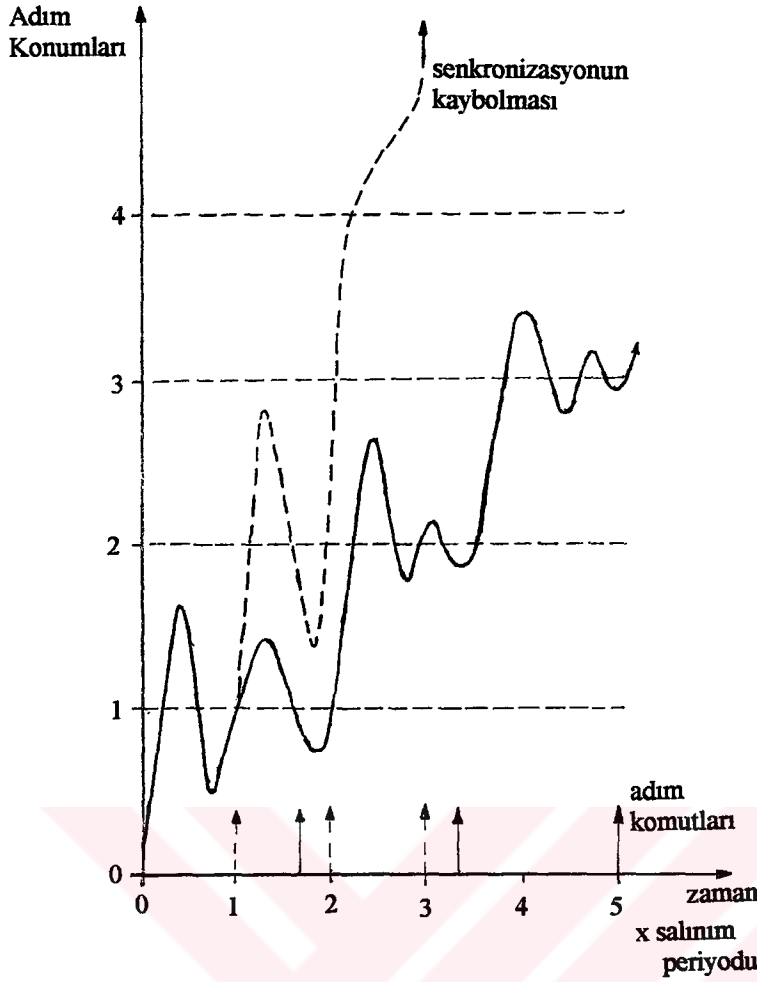
Tutma momenti eğrisi bu cevaptaki aşım ve osilasyonun sebebini açıklamaktadır. Yeni bir faz uyarıldığında, rotor ve stator dişleri arasında oluşan moment, rotoru yeni karalı duruma doğru çekecektir.

Bu moment rotor adım konumuna gelene kadar devam edecek rotor bu konumu geçip aşım yapınca da ters yönde bir moment olarak rotora etki edecektir. Rotor, adım konumundan tekrar geriye geçince bu moment tekrar rotora etki edecek ve bu hareket rotorun kinetik enerjisinin tümü kaybolana kadar devam edecektir.

Bu cevaba ait önemli bir büyüklük olan yükselme zamanı, motorun istenen adım konumuna ilk ulaştığı andır. Rotor bu noktaya ulaştığında hızı maksimum değerinde olacağından, sistem hedefi aşacaktır. Bu ilk aşımın genliği, adım büyüklüğünün yüzdesi olarak ifade edilir ve yüzde aşım olarak tanımlanır. Step motorlarda bu değer genellikle %80-90 mertebelerine çıkar. Yerleşme süresi ise sistem osilasyonunun hedefinin $\pm\%5$ 'ine ilk girdiği an olarak tanımlanır ve bir kaç yüz milisaniye sürebilir.

Hız gerektiren uygulamalarda büyük aşım ve salınımlı cevap bir dezavantajdır. Örneğin, bir yazıcıda her yeni karakterin basımından önce motorun istenen konuma yerleşmesini beklemek gerekeceğinden bu sistemin yavaşlamasına sebep olacaktır.

Tek adımın önemli olmadığı, arka arkaya bir kaç adımın atılmasının gerektiği, hızlı sistemlerde ise motorun ikinci adım konumuna oturmasını beklemeden ikinci adım atılabilir. Şekil 3.4.'den de anlaşılacağı üzere adımlama hızı, denge konumu civarındaki rotor osilasyonunun doğal frekansına eşit ise, uyarma darbesi-adım hareketi senkronizasyonu bozulacak ve rotor istenenden bir kaç adım daha fazla atacaktır.



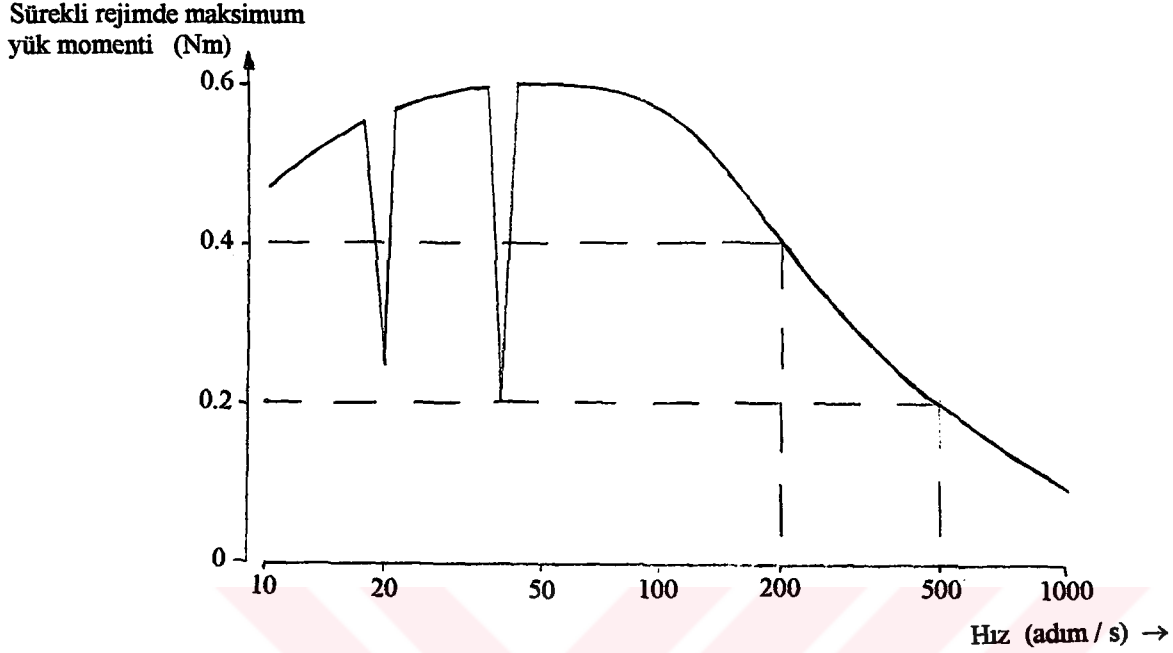
Şekil 3.4. Doğal frekansa yakın hızlarda step motorunun davranışı

Bu davranışın nedeni, ikinci adım darbesi geldiğinde rotor hızının maksimum değerinde olması ve salınım genliğinin yarım diş genişliğinden büyük olmasıdır. Bu durumun rotor davranışına etkisi, sürekli rejimde maksimum yük momentinin incelenmesi sırasında ele alınacaktır.

Görülüyor ki adım motorundan maksimum performans alabilmek için tek adım cevabındaki aşım ve salınımların azaltılması, yerleşme süresinin kısaltılması gerekmektedir. Bu nedenle tek adım cevabının iyileştirilmesi, adım motorlarının kontrolünde çok büyük bir öneme sahiptir.

3.5. Sürekli Rejimde Maksimum Yük Momenti Eğrisi;

Bir step motor, mekanik yükün pozisyonunu bir kaç adımlık bir hareketin sonunda değiştirebilmek için kullanılacaksa, motorun hızlanma, yavaşlama veya sabit hızda dönme durumlarında ne kadar moment indükleyeceğinin bilinmesi gerekir.



Şekil 3.5. Sürekli rejimde maksimum yük momenti/hız eğrisi

Sürekli rejimde maksimum yük momenti/hız eğrisi, herhangi bir sabit dönüş hızında, rotor hareketinin giriş darbe dizisiyle olan senkronizasyonunu bozmadan ve rotorun durmasına neden olmadan sürekli halde motor miline uygulanabilecek maksimum yük momentini verir. Bu moment aynı zamanda, söz konusu hızda motorda indüklenebilecek maksimum moment anlamına da gelir. Bu eğri oluşturulurken, eğrinin her bir noktası için, motor ilgili hıza ulaşana kadar boşa hızlandırılır. Daha sonra motora uygulanan yük momenti giderek artırılarak, motorun durmasına yada giriş darbe dizisiyle olan senkronizasyonun bozulmasına neden olmayan en yüksek yük momentini saptanır. Bu momente, o hız için sürekli rejimde maksimum hız momenti denir. Belli bir yük momentini için, motorun durmasına yada giriş darbe dizisiyle olan senkronizasyonun bozulmasına neden olmadan çalışabilecek en yüksek hız da, maksimum sürekli rejim hızı olarak isimlendirilir.

Klasik motorlarda bu eğriye karşılık gelebilecek bir karakteristik yoktur. Maksimum yük momenti eğrisi, çalışma noktalarını göstermez, bir transfer fonksiyonu eğrisi de değildir. Sadece çalışma bölgesini sınırlar. Bu eğrinin sınırladığı bölge içinde herhangi bir noktada

motor giriş darbelerini kaybetmeden ve durma tehlikesi olmadan ilgili hız ve momenti ile çalışır. Sınırlar dışına çıkıldığında motorun davranışı için aynı şey söylenemez.

100 adım/saniyeye kadar olan düşük hızlarda faz akımı sargılarda nominal değerine kadar kolaylıkla yükselebildiğinden, indüklenen moment de büyük olmaktadır. Bu durumda maksimum moment, tutma momenti eğrilerinden elde edilebilir. Adım hızı yükseldikçe sargı akımları nominal değerlerine yükselemeden ikinci adım darbesi geldiğinden, moment, düşük hızlardaki moment kadar yüksek olmamakta, motor hızlandıkça üretebileceği maksimum moment azalmaktadır. Fazlarda akımın çabuk yükselmesini sağlayacak sürücü devrelerle yüksek hızlarda motorda indüklenerek momenti arttırmak mümkündür.

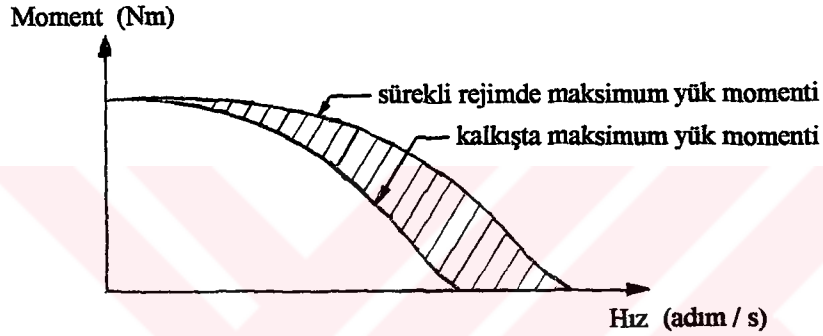
Bu eğrideki iki derin çukur, tüm step motorları sistemlerinde mekanik rezonansın etkileridir. Tek adım cevabının incelenmesinde de anlatıldığı gibi, adım hızı mekanik rezonansın doğal frekansa veya katlarına eşit ise veya bir başka deyişle ikinci adım darbesi geldiğinde rotor, birinci adıma ait kararlı konumunu geçmiş ve pozitif hıza sahip ise yeni darbenin gelişi senkronizasyonun kaybolmasına neden olur. Rotorun alacağı konum önceden kestirilemez. Rotor gidip yerleşeceği böyle bir konumdan sonra tekrar harekete geçmek için yeni konumuna ait uyarma darbesinin sürücü lojik'i tarafından gönderilmesini bekler. Bu durumda, motorun bir süre durmasına ve momentin düşmesine sebep olur.

Mekanik salınımın sebep olduğu bu istenmeyen davranış, motorların salınımlarının azaltılması bir ölçüde olsa giderilebilmektedir.

3.6. Kalkışta Maksimum Yük Momenti Eğrisi;

Özellikle açık çevrim çalışmada, duran bir sistemi istenen pozisyona getirebilmek için; motorlara uygulanan uyarma darbelerinin motor tarafından hiç kaçırılmadan takip edilmesini sağlamak çok önemlidir. Ancak gelen uyarma darbelerinin sıklığı motorun miline bağlı yükü sıfır hızından itibaren kaldırıp hızlandırmasına izin vermeyebilir. Bu yüzden step motorları için kalkışta maksimum yük momenti eğrileri tanımlanır.

Bu eğrilerde yatay eksen motorun adımlama hızına yani motora uygulanacak giriş darbelerinin frekansına karşılık düşerken, dikey eksen de bu hızlarda motorun giriş darbeleriyle olan senkronizasyonunu bozmadan harekete geçirebileceği duran yükü gösterir. Bu eğrilerin her biri belli bir eylemsizlik için tanımlanırlar ve sadece o eylemsizlik için geçerlidirler. Belli bir yükü, uyarma darbelerinin hiç birini kaybetmeksizin üzere kullanılabilecek maksimum hıza maksimum kalkış hızı denir. Bu hız aynı yük için maksimum sürekli rejim hızından çok daha düşüktür.



Şekil 3.6. Sürekli rejimde maksimum yük momenti ve kalkışta maksimum yük momenti eğrileri

Kalkışta maksimum yük momenti değerleri de tutma momenti eğrilerinden elde edilebilmektedirler. Bu moment değerleri de motorun sürülme şekline son derece bağlıdır. Akımın hızlı yükselebildiği sistemlerde tutma momenti de hızla artacağından ve adım konumuna erken yerleşeceğinden tüm sistemin hızlandırılabilmesi mümkündür.

Bu bölümde incelenen tüm büyüklüklerde de görüldüğü gibi, step motorun performansını arttırmak için adım cevabının iyileştirilmesi gerekmektedir. Bu sorun bu güne kadar genellikle mekanik yolla veya elektronik katlarla ya da basit prensipli özel sürücü devrelerle çözümlenmeye çalışılmıştır.

4. ELEKTROMANYETİK TEORİSİ, STEP MOTORLARIN YAPILARI VE MOMENT ÜRETMELERİ

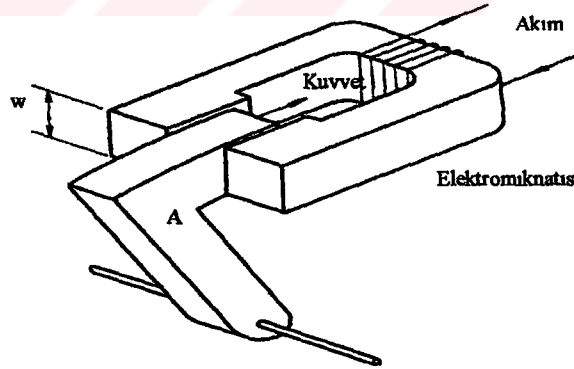
Bir önceki bölümde step motorların tipi yapıları, çalışma prensipleri avantajları ve kullanım alanları üzerinde duruldu. Bu bölümde ise ayrıntılı olarak elektromanyetik teorisi ve step motorların moment üretmeleri elektrodinamik yaklaşımla incelenecektir.

4.1. Değişken Relüktanslı Tip Step Motorda Statik Moment Oluşumu

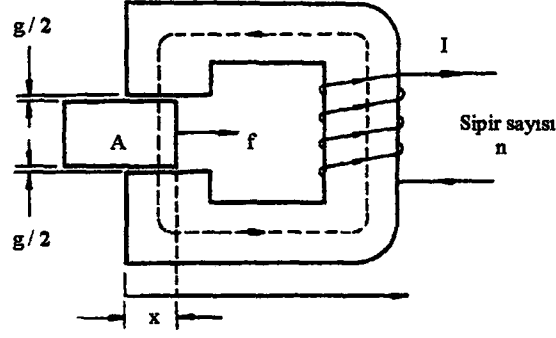
Bir elektrik motorunda moment oluşumu bir çok yöntem yardımıyla açıklanabilir. Biz bu bölümde step motorun devre parametrelerine uygun olan manyetik enerji ve koenerji prensibine dayanan yöntem ile moment oluşumunu açıklanacaktır. Öncelikle ideal olarak rotor ve statorun sonsuz manyetik geçirgenliğe sahip oldukları düşünülmüş adım-adım rotor ve statorun manyetik doyuma ulaşmaları durumu dikkate alınmıştır.

4.1.1. Sonsuz manyetik geçirgenlik durumu;

Şekil 4.1.'de görülen düzenek tarafından üretilen manyetik alan nedeniyle hareket eğiliminde olan demir parçasının davranışını açıklamak üzere şekil 4.2.'deki model kullanılabilir.



Şekil 4.1. Elektromanyetik alan içindeki demir parçası



Şekil 4.2. Step motor prensibinin açıklanabileceği basit bir model

Şekil 4.2.'de görüldüğü gibi n sarımlı bobinden geçen I akımı manyetik akıyı meydana getirirken, demir parçasını x yönünde hareket ettirecek bir f kuvvetinin varlığından söz edilebilir. Burada demir parçası step motorun rotor dişi, n sarımlı bobinin üzerinde bulunduğu yapı ise step motorun statoru olarak düşünülebilir. Öncelikle hava boşluğunda meydana gelen manyetik akıyı tariflemek gerekirse Ampere yasasının bilinmesi gerekir.

Ampere Yasası; Birimi metre başına Ampere olan H vektörü ile birimi tesla olan B vektörü arasında;

$$B = \mu H \quad (4.1.)$$

Bağıntısı bulunduğu bilinmektedir. Ampere yasası H vektörü ile ilgilidir. Ampere' in deneylere dayanarak elde ettiği yasanın ifadesi aşağıdaki gibidir.

H vektörünün kapalı bir eğri boyunca hesaplanan eğrisel integrali, integrasyon yolunun çevrelediği toplam akıma eşittir.

Yukarıdaki ifadenin matematiksel notasyonu Şekil 4.2.'deki devre için yapılacak olursa;

$$\int H dl = nI \quad (4.2.)$$

bağıntısı yazılabilir. Bu eşitliğin sol tarafı;

$$\int H dl = H_g \left(\frac{g}{2}\right) + H_g \left(\frac{g}{2}\right) + H_i = H_g g + H_i l \quad (4.3.)$$

yukarıdaki gibi yazılabilir. Burada H_g : boşluklardaki manyetik alan yoğunluğu, H_i : sarımın üzerinde bulunduğu metalin içindeki manyetik alan yoğunluğu, l : devredeki toplam yol olarak yer almaktadır.

Eğer malzemenin manyetik geçirgenliği çok yüksek olursa (4.1.) bağıntısından hareketle malzemenin içindeki manyetik alan yoğunluğunun (H_i) sıfır olacağı söylenebilir. Bu durumda (4.3.) bağıntısından;

$$H_g = nI/g \quad (4.4.)$$

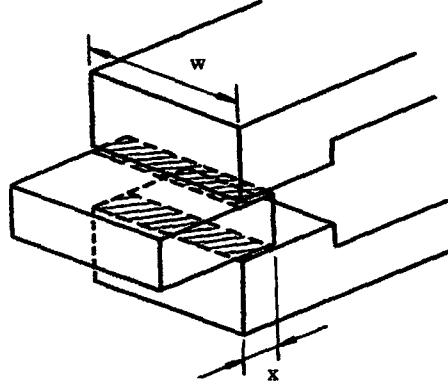
yazılabilir. Hava boşluğundaki akı yoğunluğu ise;

$$B_g = \mu_0 nI/g \quad (4.5.)$$

olarak tariflenebilir. Şekil 4.3.'de görülen düzenekte demir parçasının manyetik alana dik olarak giren kısmının genişliğinin w ve manyetik alan içindeki kısmının x olduğunu düşünerek manyetik alan tarafından kapsanmış kısmının alanını wx olduğunu söyleyebiliriz. (4.4.) bağıntısı bu alan ile çarpılırsa;

$$\phi = wx\mu_0 nI/g \quad (4.6.)$$

manyetik akı miktarı bulunur.



Şekil 4.3. Kaplanmış alan

Bu arada bir bobindeki sargı sayısı ile bu sargıdan geçen kuvvet çizgilerinin sayısının çarpımı;

$$\psi = n\phi = wx\mu_0 n^2 I/g \quad (4.7.)$$

şeklinde verilebilir. Bu ifadeye dayanarak Δt süresince Δx kadar bir hareket olduğunu düşünerek akı bağıntısındaki artış aşağıdaki gibi olur.

$$\Delta\psi = wx\mu_0 n^2 I/g \Delta x \quad (4.8.)$$

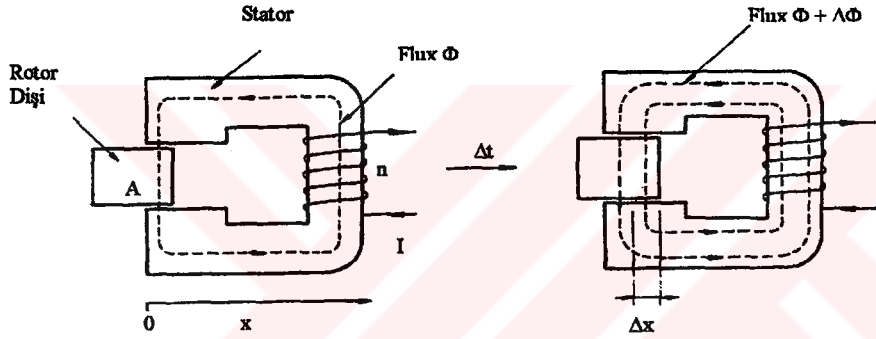
Bununla birlikte Δx kadarlık hareket sonucu endüklenen e.m.k.'nin değeri de aşağıdaki gibidir.

$$e = -\Delta\psi/\Delta t = -wx\mu_0 n^2 I/g \Delta x/\Delta t \quad (4.9.)$$

yukarıdaki – işareti endüklenen gerilimin akıma ters yönlü olduğunu göstermektedir. Söz konusu I akımı bir kaynak tarafından sağlandığından Δt süresince bu kaynağın yapmış olduğu iş;

$$\Delta P_i = I |e| \Delta t = (wx\mu_0 n^2 I^2 / g) \Delta x \quad (4.10.)$$

şeklinde ifade edilebilir. Yukarıdaki bağıntılarda bobinin direnci hesapları kolaylaştırmak için çok küçük olduğu düşünülmüştür.



Şekil 4.4. Δt süresinde rotor dişinin manyetik alan tarafından Δx kadarlık hareketi

Kaynak tarafından yapılan işin bir kısmı mekaniki harekete dönüşmekte, bir kısmı ise hava boşluğunda manyetik alan enerjisi olarak harcanmaktadır. Bu kaybolan enerjideki artış miktarı;

$$\Delta W_m = 1/2 B_g^2 / \mu_0 x \text{ (Hava boşluğundaki artış)}$$

$$= B_g^2 g w \Delta x / 2 \mu_0 \quad (4.11.)$$

(4.11.) bağıntısından hareketle ΔP_i gücünün yarısının mekanik enerjiye dönüştüğünün yarısının da hava boşluğunda manyetik enerji şeklinde açığa çıktığını söyleyebiliriz. Mekanik olarak yapılan iş;

$$f\Delta x = B_g^2 g w \Delta x / 2\mu_0 \quad (4.12.)$$

şeklinde ifade edilebilir ve her iki taraftaki Δx ' ler sadeleştirilirse;

$$\Delta x = B_g^2 g w / 2\mu_0 \quad (4.13.)$$

bağıntısı elde edilir ki B_g ' nin değeri (4.5.)'da yerine yazılırsa;

$$f = w \mu_0 n^2 I^2 / 2g \quad (4.14.)$$

elde edilebilir. Diğer taraftan hava boşluğundaki manyetik enerji;

$$W_m = B_g^2 g w \Delta x / 2\mu_0 \quad (4.15.)$$

şeklinde yazılabilir. (4.13). ve (4.15.) bağıntıları karşılaştırılırsa;

$$f = dW_m/dx \quad (4.16.)$$

eşitliği elde edilir. Bu durumda en önemli nokta bütün bu ifadelerde ve temel olarak demir parçasının yer değiştirmesi sırasında I akımının sabit kaldığının varsayılmış olmasıdır. Bu sebepten 4.16. eşitliği;

$$f = (\partial W_m / \partial x)_{I=\text{sabit}} \quad (4.17.)$$

şeklinde yazılmalıdır. Bu bağıntı bobin direncinin sıfır olmadığı bir başka deyişle genel durum için geçerlidir. Diğer taraftan manyetik akımında sabit kaldığı varsayılarak bir başka bağıntıda elde edilebilir fakat (4.17.) bağıntısı step motorların incelenmesinde kullanmak için daha uygundur.

4.1.2. Sabit manyetik geçirgenlik durumu;

Yukarıda bahsedilen ve stator yapısının sonsuz manyetik geçirgenliği olduğu durumda manyetik alan sadece hava boşluğunda meydana gelir ve bu tür bir olayın yukarıda yapıldığı gibi matematiksel incelemesi oldukça basittir. Diğer taraftan statoru oluşturan malzemenin sabit bir manyetik geçirgenliğe sahip olması durumunda ise manyetik alan sadece hava boşluğunda değil statorda da ortaya çıkar. Bu gibi durumları elektromanyetik teori ile incelemek kolay değildir. Bu nedenle bu bölümde rotora hareket sağlayan kuvvetin ifadesi devre parametrelerine bağlı olarak ve statoru oluşturan malzemenin manyetik geçirgenliğinin manyetik alanın bir fonksiyonu olmadığı göz önüne alınarak verilecektir.

Şekil 4.3.'de verilen modelde akı bağıntısı bobin endüktansı cinsinden;

$$\psi = LI \quad (4.18.)$$

şeklinde ifade edilebilir. Bu durumda sistemdeki manyetik enerji;

$$W_m = \frac{1}{2} L I^2 \quad (4.19.)$$

bağıntısıyla verilir ve bu durumda demir parçası Δt süresi boyunca Δx kadar hareket ederse bobin endüktansında (L) ΔL kadarlık bir artış olduğu söylenebilir. Aynı şekilde bobinde endüklenen e.m.k;

$$e = \Delta\psi/\Delta t = \Delta(LI)/\Delta t \quad (4.20.)$$

Eğer güç kaynağı bir akım kaynağı ise metal parçanın hareketi sırasında I akımını sabit olarak sağlıyorsa yukarıdaki eşitlik;

$$e = -I\Delta L/\Delta t \quad (4.21.)$$

şeklinde ifade edilebilir. Bu durumda kaynak tarafında endüklenen e.m.k.'ya eşit fakat ters yönlü olduğundan kaynak tarafından yapılan iş;

$$\Delta P_i = I |e| \Delta t = I^2 \Delta L \quad (4.22.)$$

şeklinde yazılabilir. Diğer taraftan manyetik enerji miktarındaki artış ise;

$$\Delta W_m = \frac{1}{2} I^2 \Delta L \quad (4.23.)$$

aynı şekilde 2.22. ve 2.23. bağıntıları karşılaştırılırsa kaynak tarafından yapılan işin yarısının manyetik enerjiye dönüştüğü görülür. Diğer yarı bölüm ise mekanik enerjiye dönüşmektedir ve aşağıdaki gibi ifade edilebilir;

$$\Delta P_o = f \Delta x = \frac{1}{2} I^2 \Delta L \quad (4.24)$$

ve bu eşitlikten kuvvet bağıntısı aşağıdaki gibi bulunur.

$$f = \frac{1}{2} I^2 \Delta L / \Delta x \quad (4.25.)$$

Yukarıdaki hesaplamalarda bobin direncinin sıfır olduğu ve kaynağın bir akım kaynağı olduğu düşünülmüştür. Fakat son olarak bulunan (4.25.) bağıntısı genel durumlara uygulanabilir. Bu durumda demir parçası üzerinde etkili olan kuvvet bobin endüktansını arttıracak yönde olacaktır.

4.1.3. Manyetik doyuma ulaşma durumu;

Bütün step motorların karakteristik olarak statorlarının manyetik doyuma ulaşma durumları söz konusudur. Eğer bir step motor lineer B/H karakteristik bölgesinde çalışmak üzere tasarlandıysa bu motorun üretebileceği birim moment çok küçük olacağından söz konusu bu motor pratik uygulamalarda kullanılmayacak kadar büyük yapıya sahip olacaktır. Bu nedenle manyetik doyumu göz önüne almayan teori pratik değildir. Statordaki manyetik doyuma dikkate alan bir moment teorisi şu şekilde verilmiştir. (*Stepping motors and Their Microprocessor Control, T.Kenjo p.p.72,74*)

Şekil 4.3.'de verilen modeli temel alarak enerji dönüşümü incelenirse ki faz akımının oluşturduğu manyetik alanın yarattığı kuvvetinin etkisiyle rotor x_0 ' dan $x_0 + \Delta x$ konumuna hareket etmektedir, manyetik akının (ψ) x ve I akımına bağlı olduğu söylenebilir ve $\psi(x, i)$ şeklinde ifade edilir. Eğer hareket sırasında I akımının sabit kaldığı düşünülürse güç kaynağı tarafından Δt zamanında yapılan ΔP_i işi;

$$\Delta P_i = I v \Delta t = I \Delta \psi / \Delta t = I \Delta \psi \quad (4.26.)$$

yukarıdaki gibi verilebilir. Diğer taraftan Δt süresi boyunca rotor tarafında yapılan mekanik iş;

$$\Delta P_o = f \Delta x \quad (4.27.)$$

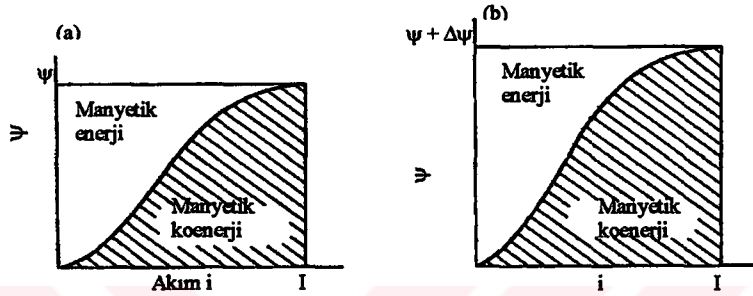
şeklide olur. Δx kadarlık bir hareket sonucu sistemin mekanik enerjisindeki artış miktarı;

$$\Delta W_m = \int_0^{\psi + \Delta \psi} i d\psi(x_0 + \Delta x, i) - \int_0^{\psi} i d\psi(x_0, i) \quad (4.28.)$$

şeklinde ifade edilebilir. Bu eşitlikte i akımı 0'dan I değerine kadar değişen bir değişken olarak dikkate alınmaktadır. Yukarıdaki ifade incelenecek olursa ilk terim rotorun $x = x_0 + \Delta x$ konumunda iken sahip olduğu manyetik enerji ve ikinci terim ise rotorun x_0 konumunda iken sahip olduğu bir başka deyişle başlangıç manyetik enerjisidir. (4.28.) bağıntısındaki her iki teriminde integral değerleri hesaplanacak olursa sistemin manyetik enerjisi;

$$\Delta W_m = I\Delta\psi - \int_0^I \psi(x, i) di \quad (4.29.)$$

şeklinde bulunur ve sistemin rotorun her iki konumundaki manyetik enerji ve koenerjileri Şekil 4.5. olduğu gibi gösterilebilir.



Şekil 4.5. Sistemin manyetik enerji ve koenerji dağılımı

(4.26.) bağıntısında verildiği gibi yukarıdaki ifadenin ilk terimi güç kaynağı tarafından yapılan iş miktarıdır. Buradan hareketle yukarıdaki ifade basitleştirilebilir ve statoru n sarımdan ibaret bir step motor için moment ifadesi sonuç olarak şu şekilde verilebilir.

$$T = \partial / \partial \theta \sum_{i=1}^n \int_0^i \psi(\theta, i) di_i \quad (4.30.)$$

4.2. Hibrid Step Motorda Moment Üretilmesi

Bu bölümde hibrid step motorda moment üretilmesi incelenecektir. Değişken relüktanslı step motorun moment oluşturmasına ek olarak bu tip step motorlarda sürekli mıknatıslığın etkisi de göz önünde bulundurulacaktır.

Böylece (4.31) denklemi şu şekilde yazılabilir,

$$-(e_A i_A + e_B i_B) = \tau \frac{d\theta}{dt} + \frac{d}{dt} \left(\frac{1}{2} i_A^2 L_A + \frac{1}{2} i_B^2 L_B \right) \quad (4.32.)$$

Manyetik devrenin lineer olduğu ve iki faz arasındaki karşılıklı endüktansın ihmal edildiğini kabul ettiğimiz için, momenti iki bileşene ayırabiliriz,

$$\tau = \tau_A + \tau_B \quad (4.33.)$$

Böylece;

$$-e_A i_A = \tau_A \frac{d\theta}{dt} + \frac{1}{2} \frac{d}{dt} i_A^2 L_A \quad (4.34.)$$

$$-e_B i_B = \tau_{BA} \frac{d\theta}{dt} + \frac{1}{2} \frac{d}{dt} i_B^2 L_B \quad (4.35.)$$

olur.

4.2.2. Moment üretiminde sürekli mıknatısın etkisi

Her bir faz için uç gerilimi, faz sargılarında sürekli mıknatıslık akısı tarafından üretilen gerilim ve faz endüktansından geçen akımın oluşturduğu gerilim olarak iki bileşenin toplamı şeklinde ifade edilir.

A fazı için (4.34) denklemi aşağıdaki gibi yazılabilir;

$$-(e_{gA} + e_{LA})i_A = \tau_A \frac{d\theta}{dt} + \frac{1}{2} \frac{d}{dt} i_A^2 L_A \quad (4.36.)$$

Burada e_{LA} A fazından geçen akımın endüklediği gerilim,

$$e_{LA} = -\frac{d}{dt}(i_A L_A) \quad (4.37.)$$

olarak verilir ve bu denklem (4.36)' da yerine yazılırsa;

$$-e_{gA}i_A + i_A \frac{d}{dt}(i_A L_A) = \tau_A \frac{d\theta}{dt} + \frac{1}{2} \frac{d}{dt} i_A^2 L_A \quad (4.38.)$$

$$i_A \frac{d}{dt}(i_A L_A) - \frac{1}{2} \frac{d}{dt} i_A^2 L_A = i_A^2 \frac{dL_A}{dt} + L_A i_A \frac{di_A}{dt} - \frac{1}{2} L_A \frac{di_A^2}{dt} - \frac{1}{2} i_A^2 \frac{dL_A}{dt} \quad (4.39.)$$

ikinci ve üçüncü terim birbirini götürür ve;

$$\frac{1}{2} i_A^2 \frac{dL_A}{dt} = \frac{1}{2} i_A^2 \frac{dL_A}{d\theta} \frac{d\theta}{dt} \quad (4.40.)$$

Bu (4.36)'da yerine yazılırsa A fazının momentini;

$$\tau_A = -\frac{e_{gA}i_A}{\theta} + \frac{1}{2} i_A^2 \frac{dL_A}{d\theta} \quad \text{ve} \quad \theta = \frac{d\theta}{dt} \quad (4.41.)$$

(4.41.) denkleminin sağ tarafındaki ikinci terim, rotor konumunun değişimi ile oluşan momenti temsil eder ki bu da değişken relüktanslı motorun moment üretme prensibidir. Tipik hibrid step motorlarda, faz endüktansından dolayı oluşan moment kalıcı momente göre değişiminin çok düşük olması sebebiyle ihmal edilebilir.

$$\tau = -(e_{gA}i_A + e_{gB}i_B)/\theta \quad (4.42.)$$

her bir fazda endüklenen gerilim;

$$e_{gA} = n(-\phi_1 + \phi_3 - \phi_5 + \phi_7) \quad (4.43.)$$

$$e_{gB} = n(-\phi_2 + \phi_4 - \phi_6 + \phi_8) \quad (4.44.)$$

Burada n ; kutuplardaki sarım sayısını, ϕ_k ; Kutupların sabit manyetik akısını ifade etmektedir. e_g 'nin değişiminin biraz harmonik içeren sinüs dalga değişimine benzediğini biliyoruz. Eğer harmonikli bileşenler ihmal edilirse ;

$$e_{gA} = \omega C \cos(\omega t - \rho) \quad (4.45.)$$

$$e_{gB} = \omega C \cos(\omega t - \rho) \quad (4.46.)$$

olur ki, burada C ; motorun boyutlarına ve sarım sayısına bağlı bir sabittir, ρ ; radyal olarak faz açısıdır. Buradaki açısal frekans ω , açısal hız ve rotor diş sayısına bağlıdır.

$$\omega = N_r \dot{\theta} \quad (4.47.)$$

4.2.3. Sabit moment

Her bir fazdaki akım ve endüklenen gerilimin sinüsoidal dalga şekline sahip olduğu ve aynı fazda oldukları kabul edildiğinde ;

$$i_A = -I_M \sin \omega t \quad (4.48)$$

$$i_B = +I_M \cos \omega t \quad (4.49)$$

(4.47.), (4.48.), (4.49) ifadelerini (4.42.) eşitliğinde yerine yazarsak;

$$\tau = -\frac{\omega C I_M}{\theta} [\sin(\omega t - \rho) \cos \omega t - \cos(\omega t - \rho) \sin \omega t] \quad (4.50.)$$

$$\tau = C N_r I_M \sin \rho$$

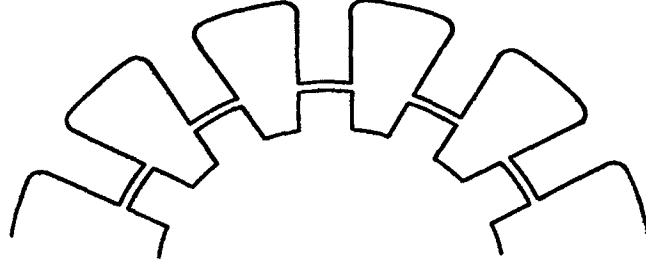
Yük momenti ile dengeli olmak zorunda olan motor momenti, “sin ρ ” ile doğru orantılı olduğu için “ ρ ” moment açısı veya yük açısı olarak adlandırılır. Eğer sabit mıknatısın endüklemediği gerilim ve akımın her ikisi de sinüsoidal dalga şekline sahip iseler hibrid motorda moment sıçramaları olur. Bir çok uygulamada akım dalga şekli sinüsoidal değişimden farklı olduğundan moment sıçrama bileşenleri büyük olur. Ayrıca şunu da belirtmek gerekir ki rotor mıknatısındaki harmonikler sebebiyle uygulanan akım sinüsoidal değişime sahip olmasa da bu moment sıçramaları olacaktır.

4.3. Diş Yapısı, Sayısı ve Kutup Düzeni

Step motorların geleneksel motorlardan çok farklı yapıya sahip oldukları hemen görülmektedir. Bir motorun moment üretebilmesi en önemli karakteristik yapısı dişlerine bağlıdır. Diğer tüm dönen veya lineer hareket eden motorlarda moment üretimi için diş yapısı gerekli değildir. Fakat yine de bu tip motorlarda uygulanan diş yapısının amacı stator ve rotor arasındaki reluktansı en aza indirmektedir. Step motorlarda ise moment üretimi için hem rotorda hemde statorda diş bulunması temel olarak gereklidir. Bu bölümde step motorlardaki diş yapısı, sayısı, ve bunların ilişkileri incelenecektir.

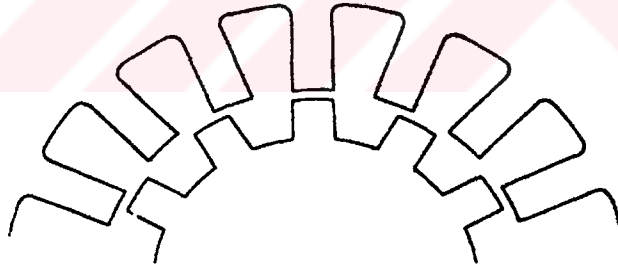
4.3.1. Diş yapısı

Değişik tipteki motorların diş yapıları üç temel grupta toplanabilir. Birinci grup şekil 4.7’de görüldüğü üzere stator ve rotorda eşit sayıda diş bulundurur. Bu tip yapı çok kütleli step motorlarda bulunan yapıdır.



Şekil 4.7. Rotorda ve statorda aynı sayıda diş bulunan yapı

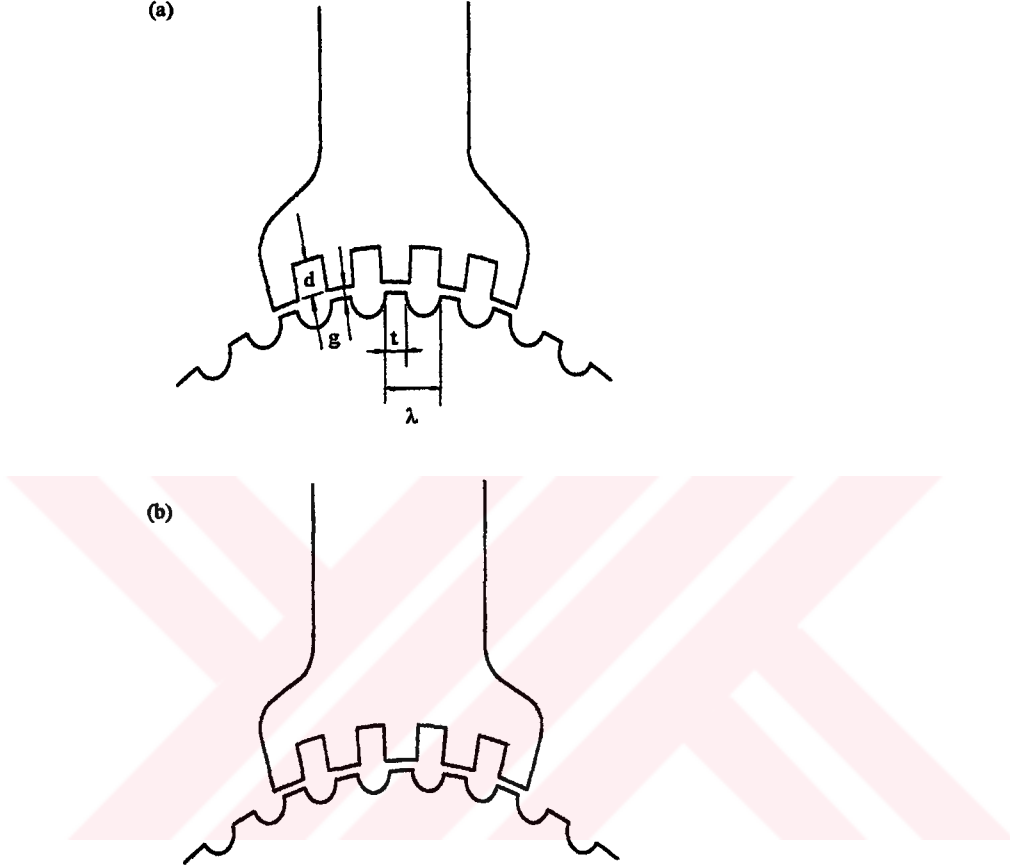
Bu tip yapıda dişler aynı anda enerjilendirilir ve enerjileri kesilir. İkinci tip yapı şekil 4.8.’de görüldüğü gibidir.



Şekil 4.8. Rotorda ve statorda farklı sayıda diş bulunan yapı

Bu tip yapılar genellikle tek kütleli değişken relüktanslı tip ve büyük adım açılı step motorlarda kullanılan türlerdir ve tür makinalarda dişler aynı anda enerjilendirilmezler. Son olarak üçüncü tip diş yapısı şekil (4.8.)’de verildiği gibidir. Bu yapıda stator dişleri stator kutupları altında gruplandırılmışken rotor dişleri homojen bir şekilde dağıtılmıştır. Bu tip yapı tek kütleli değişken relüktanslı tip ve küçük adım açılı step motorlarda

kullanılmaktadır. Bununla birlikte hibrid tip step motorlarda rotor ve stator diş sayısında çok küçük bir fark vardır. Örneğin, statorda 50 diş var iken rotorda 48 diş bulunur.



Şekil 4.9. Bir hibrid tip step motorun diş yapısı (a)rotor ve stator diş sayıları farklı (b)rotor ve stator diş sayıları aynı

Bir step motorun dizaynı sırasında diş/slot oranı karar verilmesi gereken en önemli unsurdur. Çünkü bu faktör bir step motorun statik moment karakteristikleri ile yakından ilgilidir. Aynı zamanda diş/slot oranı bir step motorun dinamik karakteristiklerinde belirleyici bir rol oynar çünkü bu oran her bir fazın endüktansını belirler.

Step motorlar çok değişken yapı gruplarına sahip olmalarına rağmen değişken relüktanslı tip step motorlarda moment üretimi Şekil 4.6'de gösterildiği gibi basit manyetik yapıya dayandırılabilir. Bu tür diş yapısına sahip motorlarda doyuma girmeyi de göz önüne alarak statik moment oluşumunu açıklayan bir teori ortaya koymuşlardır. Bu çalışmaya göre mümkün olan en büyük moment en küçük adım açısında ortaya çıkabilir. Ve optimum diş-

genişlik / diş-sayısı oranı (t/λ) teorik olarak 0.42 dir. Yine bu teoriye göre pratik uygulamalarda bu oran 0.38 ile 0.48 arasında değişmektedir.

Modern değişken relüktanslı tip ve hibrid step motorlar aşağıda belirtilen genel karakteristiklere sahiptirler.

1. Diş-genişlik / Diş-sayısı oranı (t/λ) 0.5 civarındadır.
2. Statordaki slot derinliği d yaklaşık olarak diş genişliğinin yarısı kadardır.
3. Rotor için diş-genişlik / diş-sayısı oranı (t/λ) 0.38 ile 0.45 arasındadır.
4. Rotor için slot yapısı yarı daireseldir, stator için ise dikdörtgen veya yarı daireseldir.
5. Hava boşluğunun genişliği g mümkün olduğu kadar küçük olmalıdır. Yaklaşık olarak 0.02-0.05 arası.

4.3.2. Faz, diş ve adım sayısı ilişkileri

m fazlı rotorunda N_r adet diş bulunan bir motor için bir hareketteki adım sayısı şu genel ifade ile verilir.

$$S = m N_r \quad (4.51.)$$

Bu bağıntı bir fazın veya iki fazın devrede olduğu uygulamalarda doğrudur. Fakat yarı-adım sürme durumunda bu ifade aşağıdaki gibi olmalıdır.

$$S = 2m N_r \quad (4.52.)$$

m fazlı bir step motorda herhangi bir fazdan anahtarlama başladığını düşünelim. Anahtarlama sıralamasının bir turu tamamlandığında yine ilk enerjilenen faza sıra geldiğinde rotor m adımlık bir hareket yapmış ve rotor bir diş genişliği kadar bir yol kat etmiştir. Motora bir adım genişliğinde hareket kazandırabilmek için m adet darbeye ihtiyaç varsa motorun bir devrini tamamlaması için mN_r adet darbeye gerek vardır. Şekil 4.8.'de verilen türde rotor ve statorun farklı sayıda dişe sahip oldukları durumda yukarıdakine benze şekilde bir eşitlik şu şekilde verilebilir.

$$q = |N_r - N_s| \quad (4.53.)$$

Bu bağıntıda N_r : rotor diş sayısı

N_s : stator diş sayısı

$$q = N_s/m \quad (4.54.)$$

faz başına stator diş sayısı ifade edilebilir. (4.51.) ve (4.54.) bağıntılarından m değerini elemine edersek

$$S = N_r N_s/q \quad (4.55.)$$

$$S = N_r N_s / |N_r - N_s| \quad (4.56.)$$

Bulunabilir. Daha genel olarak (4.53.), (4.54.), (4.56.) bağıntılarından hareketle;

$$S = m(m+1)q \quad N_r > N_s \quad (4.57.)$$

$$S = m(m-1)q \quad N_r < N_s \quad (4.58.)$$

Bu tür motorlar için en geniş adım açısının 30° olduğunu şu şekilde gösterebiliriz. q' nun alabileceği en küçük değer bir rotoru hareket ettirmek için en azından iki kutup gerekeğinden 2 olabilir. En küçük mümkün m değeri ise 3' tür. Bu durumda 4.58. eşitliğinden;

$$S = 3 \times 2 \times 2 = 12$$

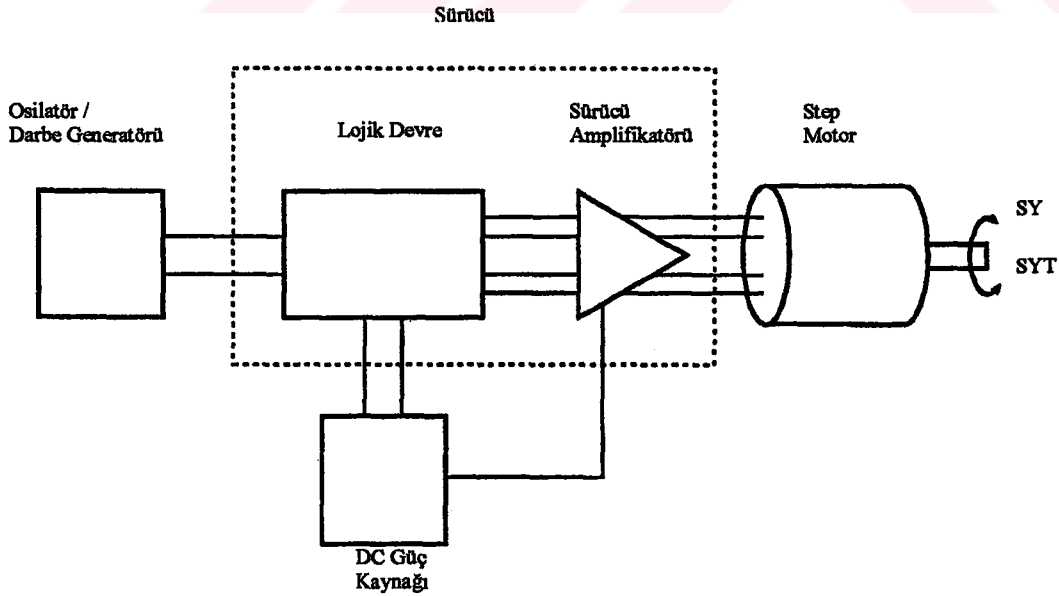
$$\theta = 360/S = 360/12 = 30^\circ \text{ olarak bulunur.}$$

5. STEP MOTORUN SÜRÜLÜŞÜ

Sürekli çalışma modunda da tek adımlı çalışma modunda da step motorun stator sargıları enerjilemek için özel bir tipte elektronik sürüş devresine ihtiyaçları vardır. Stator sargılarından geçen akımı geçici veya periyodik olarak anahtarlamaktır.

Burada step motor sürüşünün bir kaç değişik tipleri vardır. Ama bunların hepsi aynı özelliğe ve işlevliğe sahiptir.

- İstenilen performansı elde edebilmek için giriş komutlarını kesen lojik bir sistem (örneğin dönüş yönü).
- İstenilen adımlama oranını elde etmek için bir darbe generatörü veya osilatörü.
- Motor ve sürüşün doğruluğundan emin olmak için koruma ve görüntüleme sistemi.
- Step motoru sürmek için gerekli enerji seviyesini sağlayan bir güç sürüş amplifikatörü.



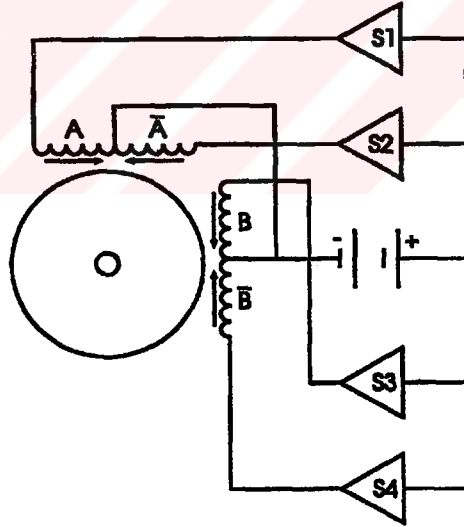
Şekil5.1. Tipik bir step motor sürüş sisteminin şematik düzenlemesi.

Takip eden kısımlarda en yaygın kullanılan step motor sürüşlerinin prensipleri detaylı olarak incelenecektir.

5.1. Tek Yönlü Sürüş

Adından da anlaşılacağı gibi tek yönlü sürüş akımın stator sargılarının her kısmından tek bir yönde akmasına izin verir. Bununla beraber dönen bir manyetik alan üretmek için (her bir sargıda pozitif ve negatif akım akışını sağlamak için), akımın sıra ile anahtarlanması gerekmektedir. Bir yolla bu potansiyelin üstesinden gelebilmek amacıyla stator sargıları sarılmalı ve bağlanmalıdır.

Bir tek yönlü sürüşte çalıştırmak için step motor 4 stator sargısının eşdeğeri ile donatılmalıdır. İki fazlı bir step motor için bu iki stator sargısının da ortasından yapılacak bir bağlantı ile gerçekleştirilebilir. Şekil 5.2. stator sargısı orta uçlu bir iki fazlı step motorun tek yönlü sürüş bağlantısının tipik bir düzenlemesini göstermektedir.



Şekil 5.2. Step motor tek yönlü tipik sürüş düzeni

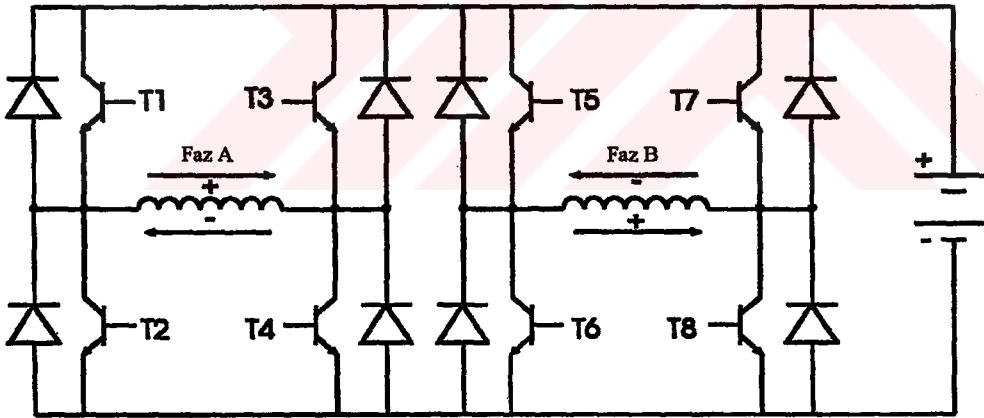
Anahtarlar mekanik veya elektronik şekilde ya tam açık yada tam kapalı olarak yapılabilirler. Her bağımsız anahtar her bir adımda istenilen akım akışını sağlamak için kullanılır. İsmen A veya A' ve/veya B veya B' aynı anda A ile A' 'den aynı şekilde B ve B' den akım akıtmanın mümkün olamayacağını görmek önemlidir.

Sadece A sargısından pozitif bir akım akıtmak için S1 anahtarı kapalı olmalıdır. Diğer üç anahtar açık kalmalıdır. Eğer aynı zamanda S2 de kapalı olsaydı oluşan iki alan birbirine ters yönde olacak ve motorun performansının fayda sağlamada hiç bir yardımı olamayacaktır. S1, S2, S3, S4'ün seçilerek anahtarlanması tam adım ve yarım adım mod sıralarının oluşturulmasını sağlayacaktır.

Tipik olarak bir tek yönlü sürüşten beslemede, eğer 4 stator sargısı da ayrı ise step motor 8 kabloya eğer ikiyeşerli gruplarla bağlanırsa 6 kabloya (Şekil 5.2.'de), eğer ortak uçlar içten bağlı ise 5 kabloya sahip olacaklardır. Şekil 5.4. değişik sürüş tipleri için sargı konfigürasyonlarını özetlemektedir .

5.2. Çift Yönlü Sürüş

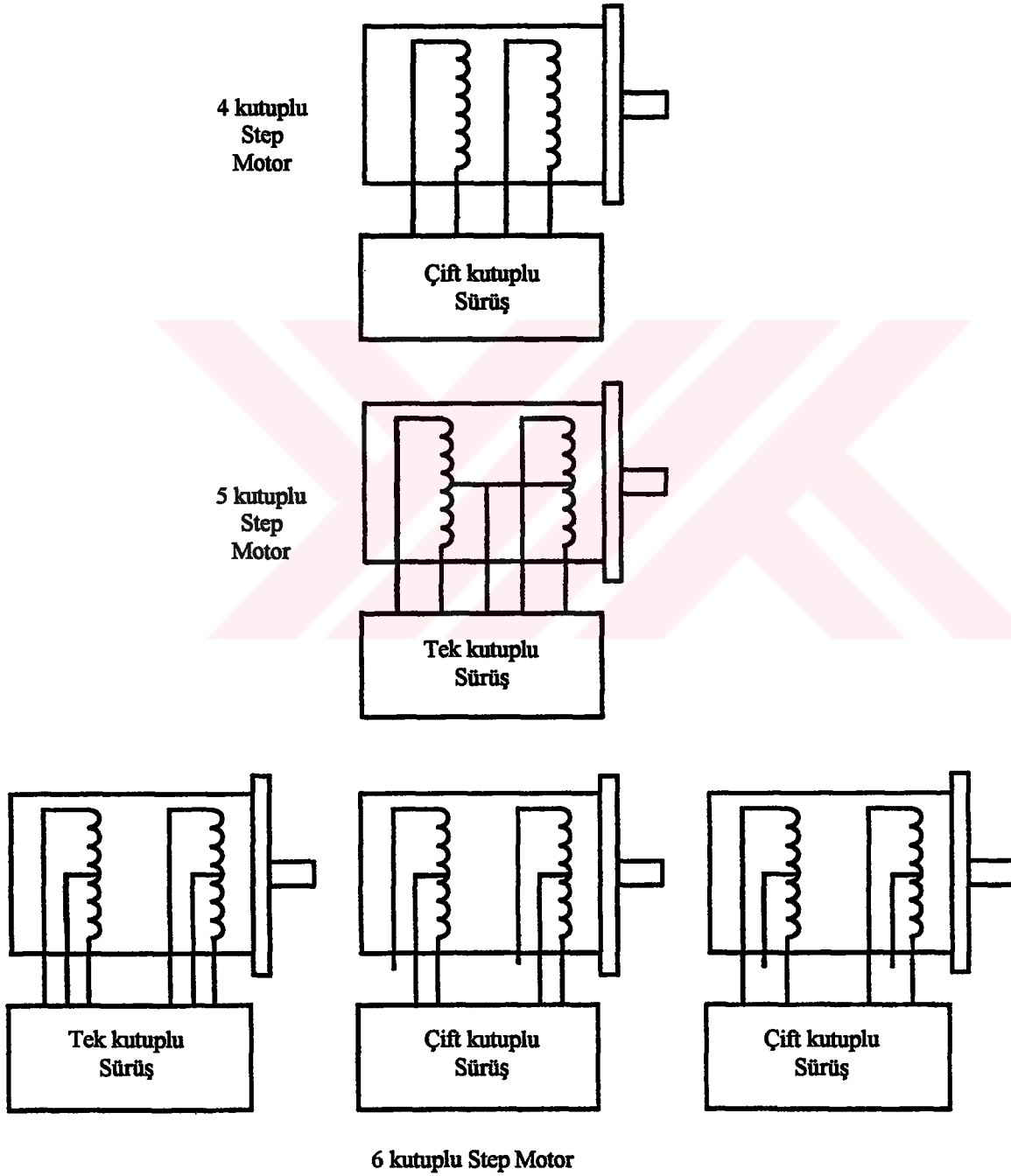
Bir iki yönlü sürüş ile, çıkış polaritesi akımın her iki yönde de aktılması sağlanarak değiştirilebilir. Step motor iki efektif sargıya sahip olmalıdır ve sadece 4 kablo ile çalıştırılabilir.



Şekil 5.3 İki fazlı step motor için tipik iki yönlü sürüş düzeni.

Transistörlerin (T1-T8) fonksiyonları her bir stator sargısından geçen pozitif ve negatif akım akışının sırasını istenildiği gibi sağlamaktadır. A fazından pozitif akımın geçmesi için T1 ve T4 transistörlerinin iletimde olabilmeleri için tetiklenmeleri gerekmektedir. A fazında negatif akım için T3 ve T2 transistörleri anahtarlanmalıdır. Böylece tek d.c güç kaynağı A fazından her iki yönde de akımın akmasını sağlayabilmektedir. Benzeri olarak pozitif ve negatif akımların B fazından da akması sağlanabilir.

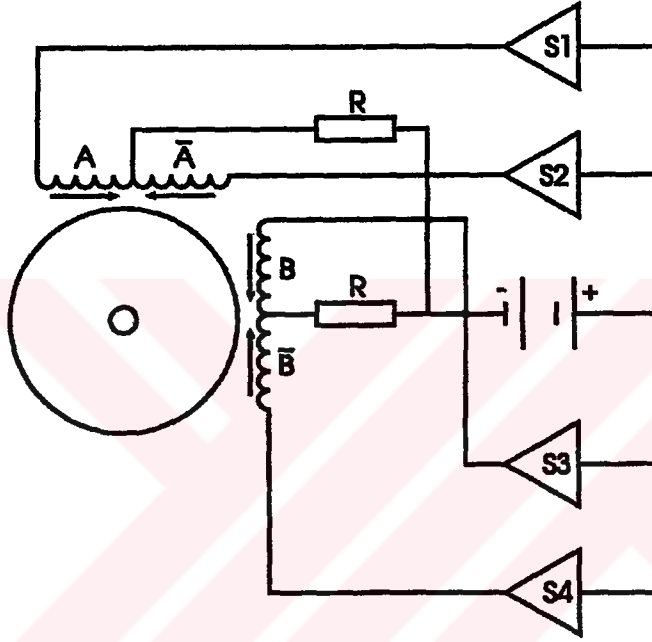
Sürekli çalışma için transistör anahtarlamalarının doğruluğu ve güvenilirlik kontrolü gereklidir. Bu Şekil 5.1. 'de gösterilen tipin lojik devresi ile elde edilir. Her bir adım sırasında sargıların tamamının kullanımı yani tek yönlü sürüşteki gibi sargının yarısıyla sınırlama olmamasından dolayı çift yönlü sürüş step motorun çalışmasını algılamasını sağlar.



Şekil 5.4. Tek veya çift yönlü sürüşlerin step motorun stator sargı bağlantıları ile bağlanabilme düzeni

5.3. R/L Sürüşü

Önceden açıkladığımız tek yönlü ve çift yönlü sürüşler için akım, istenilen stator sargısına uygulanan bir gerilimin uygulanması ile akıyor diye kabul edilmişti. Pratikte standart bir kaynaktan elde edilen akımın anahtarlanması yüksek frekansları yüksekçe olan endüktif sargılardan sertçe etkilenecektir. Bu dezavantajın üstesinden gelmek için pratikteki step motor sürüşlerine bu etkileri minimize edecek şekilde teknikler ilave edilir.



Şekil 5.5. R/L sürüşünde stator sargılarının ortak hattına seri olacak uygun dirençler in bağlanması.

Dirençlerin fonksiyonu artan gerilimin stator sargılarına ilave edilmesine izin verir. Amaç step motorun performansını arttırmaktır (özellikle yüksek adım oranlarında). Direncin (R) değeri şu formülden hesaplanabilir,

$$R = (V_s - V_m) / I \quad (5.1.)$$

Burada;

V_s : Kaynak gerilimi

V_m : Nominal motor gerilimi

I : Nominal motor akımı

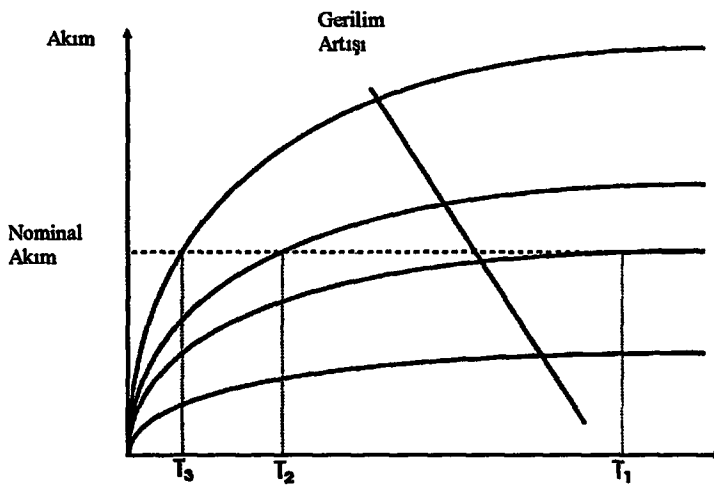
Bu sürüş sistemi çok basittir ama dezavantajlardan dolayı istenilmez. Verim düşüktür çünkü seri dirençler üzerinde çok büyük güç harcanmaktadır.

5.4. Çift Seviyeli Sürüş

Çift seviyeli sürüş istenilen çıkışı elde etmek için dikkatlice seçilmiş yüksek ve alçak gerilimlere sahip iki güç kaynağının kullanımı ile gerçekleştirilir. Her adımın başlangıcında yüksek gerilim stator sargılarına uygulanır ve akım sargının doğal endüktifliğinden dolayı üstel olarak değişecektir. Stator akımı nominal değere ulaştığında yüksek gerilim kesilir ve hiç beklemeden alçak gerilim kaynağı ile akımın nominal değerde kalması sağlanır. Darbenin sonunda alçak gerilimde kesilir.

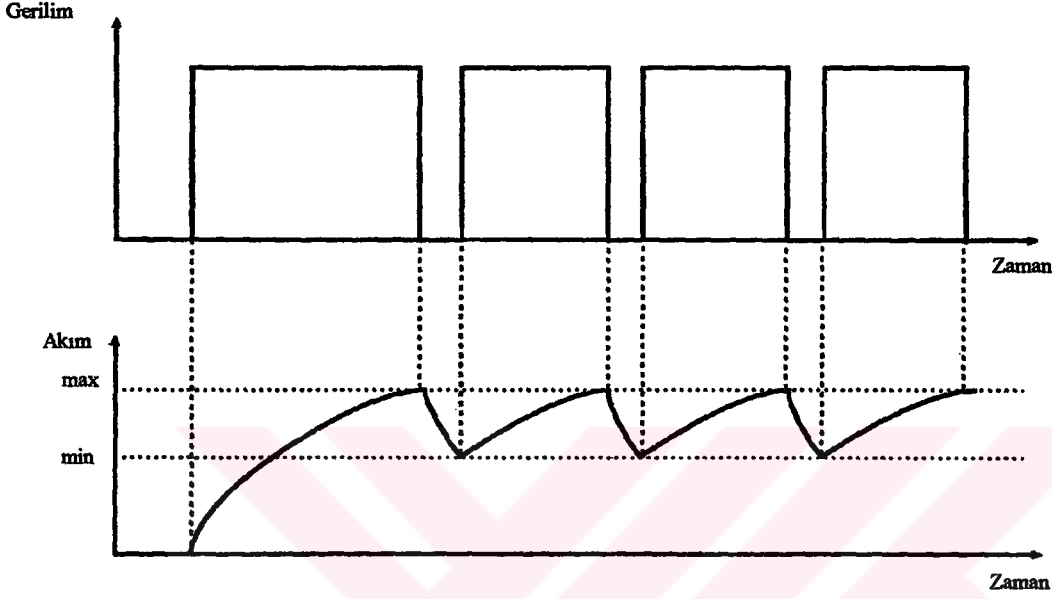
5.5. Kıyıcı Regüleli Sürüş

Kıyıcı regüleli sürüş daha karışık ve verimli step motor sürüşüdür ve step motorun çalışma performansını arttırmak için kullanılır. Bu ise her değişimde stator sargılarından akan akımın oranını artırma ile sağlanır. Şekil 5.6. değişik gerilimler ve endüktif devre için zamana karşı akımın karakteristiğini göstermektedir. Uygulanan gerilimin yükseldiği görülebilir. Akım kısa bir süre içinde nominal değerine ulaşır bu ise zaman sabitinin göz ardı edilmesidir. Motor üzerindeki etki uygulanan elektrik gücünün ortalama seviyesini arttırmaktadır ve bu da yükü süren mekaniki çıkış gücünü benzeri olarak arttıracaktır.



Şekil 5.6. Değişik gerilim değerlerindeki endüktif devredeki akım-zaman değişimi

Kıyıcı regüleli sürüşte bir yüksek gerilim kaynağı motorun nominal geriliminin 10 ila 20 katı kadardır ve bu kaynak başlangıçta stator sargılarına uygulanır ve müsaade edilen akım sargının endüktansından dolayı üstel olarak artar. Bir kıyıcı sürüşün çıkış gerilim ve akımının dalga şekilleri Şekil 5.7.'de gösterilmiştir .



Şekil 5.7. Kıyıcı regüleli sürüşte akım ve gerilimin zamana göre değişimi

Rotorun takip ettiği döner bir manyetik alan üretebilmek için bu gerilim ve akımın dalga şekilleri stator sargılarına tam veya yarım adım mod da uygulanır.

Her adım darbesi periyodunun başında sargılardan geçen akım çabucak oluşacaktır. Akım önceden belirlenmiş bir seviyeye ulaştığında gerilim kesilir ve akımın sarım direnci ve endüktansından dolayı motor sargılarında dolaşmasına izin verilir. Bu akım bir maksimum değere kadar yavaşça sönecektir ve bu seviyeye geldiğinde makineye gerilim tekrar uygulanır ve akım tekrar maksimum seviyesine çıkar. Bu uygulama periyot boyunca devam eder ve bu yüzden sargılardan geçen akımın ortalama değeri makina' nın kullanımı için uygundur.

Kıyıcı regüleli sürüşün çalışması doğal olarak kalkış ve duruş uygulamalarında çok uygundur. Çünkü yüksek gerilim ve akım rotorun ivmelenmesi için uygundur.

6. YAPILAN UYGULAMA İÇİN KARTEZYEN KOORDINATLAR MOTOR AÇISI DÖNÜŞÜM FORMÜLLERİ

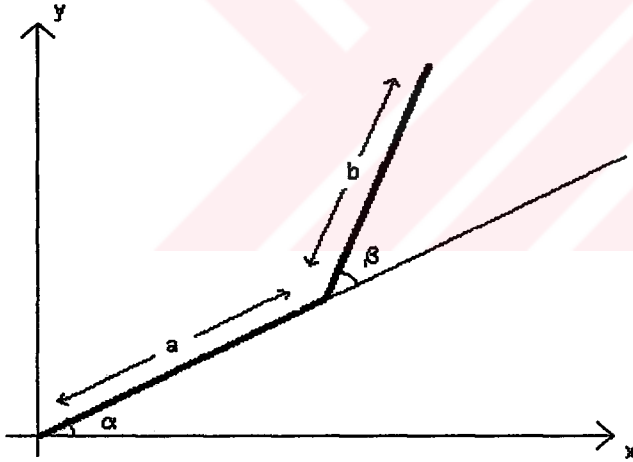
6.1. Giriş

Plotterin kontrol programı yazılırken pozisyonlama konusunda iki temel sorun ortaya çıkmıştır:

- Motor açılarını verdiğimizde robotun uç kısmının kartezyen koordinatlardaki yeri nasıl hesaplanabilir?
- Plotterin uç kısmının kartezyen koordinatlarda yerini verdiğimizde buna karşılık gelen motor açıları nasıl hesaplanabilir?

Bu sorun aşağıda verilen dönüşüm formülleri sayesinde çözülmüştür.

6.2. Motor Açılarından Kartezyen Koordinatlara Dönüşüm



Şekil 6.1. Plotter'in iki segmentinin kartezyen koordinatlarda sembolik gösterimi.

Şekil 6.1 ' de robotun kartezyen koordinatlardaki sembolik çizimi görülmektedir. Çizimdeki iki segmenti birer vektör olarak düşünersek A vektörünün koordinatları

$$x_a = a \cdot \cos\alpha \quad (6.1.)$$

$$y_a = a \cdot \sin\alpha \quad (6.2.)$$

olacaktır. B vektörünü orijine taşırsak eksenlerle yaptığı açı $(\alpha+\beta)$ kadar olacaktır. Bu durumda B vektörünün koordinatları

$$x_b = b \cdot \cos(\alpha+\beta) \quad (6.3.)$$

$$y_b = b \cdot \sin(\alpha+\beta) \quad (6.4.)$$

olacaktır. A ve B vektörlerini vektörel olarak toplarsak robotun uç kısmının kartezyen koordinatlardaki yerini bulmuş oluruz

$$x = a \cos\alpha + b \cos(\alpha+\beta) \quad (6.5.)$$

$$y = a \sin\alpha + b \sin(\alpha+\beta) \quad (6.6.)$$

6.3. Kartezyen Koordinatlardan Motor Açıklarına Dönüşüm

Bir önceki bölümde bulunan (6.5.) ve (6.6.) ifadelerinin karelerini alıp toplarsak;

$$x^2 + y^2 = a^2 + b^2 + 2ab\cos\beta \quad (6.7.)$$

sonucunu buluruz. Bu sonucu bulurken;

$$\cos(\alpha+\beta) = \cos\alpha\cos\beta - \sin\alpha\sin\beta \quad (6.8.)$$

$$\sin(\alpha+\beta) = \cos\alpha\sin\beta + \sin\alpha\cos\beta \quad (6.9.)$$

dönüşüm formülleri kullanılmalıdır. (6.7.) denkleminde $\cos\beta$ 'yı çekersek

$$\cos\beta = \frac{x^2 + y^2 - a^2 - b^2}{2ab} \quad (6.10.)$$

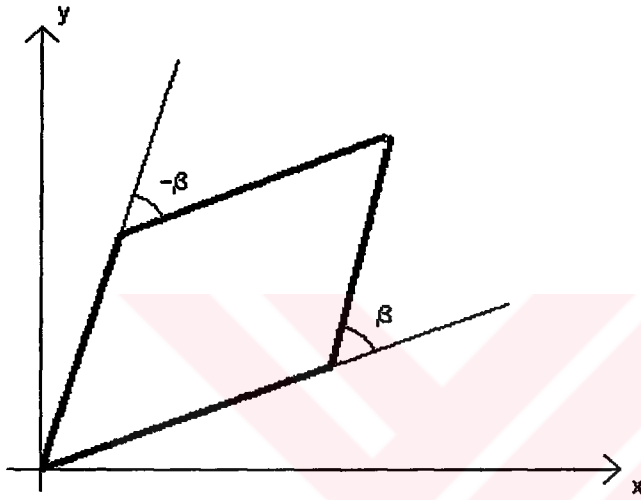
bulunur ve $\cos^2\beta + \sin^2\beta = 1$ 'den

$$\sin\beta = \pm \sqrt{1 - \cos^2\beta} \quad (6.11.)$$

hesaplanır. Son olarak;

$$\beta = \text{ArcTan}\left(\frac{\sin \beta}{\cos \beta}\right) \quad (6.12.)$$

ifadesinden β açısı hesaplanmış olur. Burada dikkat edilecek nokta (6.7.) denkleminin + ve - iki kökü olmasıdır. Bunun fiziksel anlamı robotun aynı (x,y) noktasında iki değişik şekilde bulunabilmesidir. Şekil 6.2.'de bu durum grafik olarak gösterilmiştir.



Şekil 6.2. Aynı noktada plotter'in iki farklı durumu.

β açısı bulunduğundan sonra (6.5.) ve (6.6.) denklemlerini şu formda yazabiliriz:

$$x = k \cos \alpha - l \sin \alpha \quad (6.13.)$$

$$y = k \sin \alpha + l \cos \alpha \quad (6.14.)$$

(6.13.) ve (6.14.) denkleminde

$$k = a + b \cos \beta \quad (6.15.)$$

$$l = b \sin \beta \quad (6.16.)$$

olarak alınmıştır.

$$r = \sqrt{k^2 + l^2} \quad (6.17.)$$

$$\delta = \text{ArcTan}(l / k) \quad (6.18.)$$

$$k = r \cos\delta \quad (6.19.)$$

$$l = r \sin\delta \quad (6.20.)$$

değişken dönüşümleri yapılırsa (6.13.) ve (6.14.) denklemleri şu formda

$$x/r = \cos\delta \cos\alpha - \sin\delta \sin\alpha \quad (6.21.)$$

$$y/r = \cos\delta \sin\alpha + \sin\delta \cos\alpha \quad \text{yada} \quad (6.22.)$$

$$x/r = \cos(\alpha+\delta) \quad (6.23.)$$

$$y/r = \sin(\alpha+\delta) \quad (6.24.)$$

şeklinde yazılabilir. Burdan $\alpha+\delta$ açısı

$$\alpha+\delta = \text{ArcTan}\left(\frac{y/r}{x/r}\right) = \text{ArcTan}(y/x) \quad (6.25.)$$

yazılabilir. α açısı buradan çekilince

$$\alpha = \text{ArcTan}(y/x) - \text{ArcTan}(l/k) \quad (6.26.)$$

sonucu bulunur.

$$k = a + b \cos\beta \quad (6.27.)$$

$$l = b \sin\beta \quad (6.28.)$$

değişken dönüşümleri yapılarak son olarak

$$\alpha = \text{ArcTan}(y/x) - \text{ArcTan}\left(\frac{b \sin\beta}{a + b \cos\beta}\right) \text{ olur.} \quad (6.29.)$$

6.4.Sonuç

Görüldüğü gibi mutlak koordinatlardan motor açlarına dönüşüm sırasında robotun iki farklı durumu aynı x ve y noktalarına karşılık gelebilmektedir. Kontrol programı yazılırken bu iki durum göz önünde tutularak en kısa yol hangisi ise o açı çifti seçilmelidir.

7. PLOTTER KONTROL PROGRAMININ ÇALIŞMASI

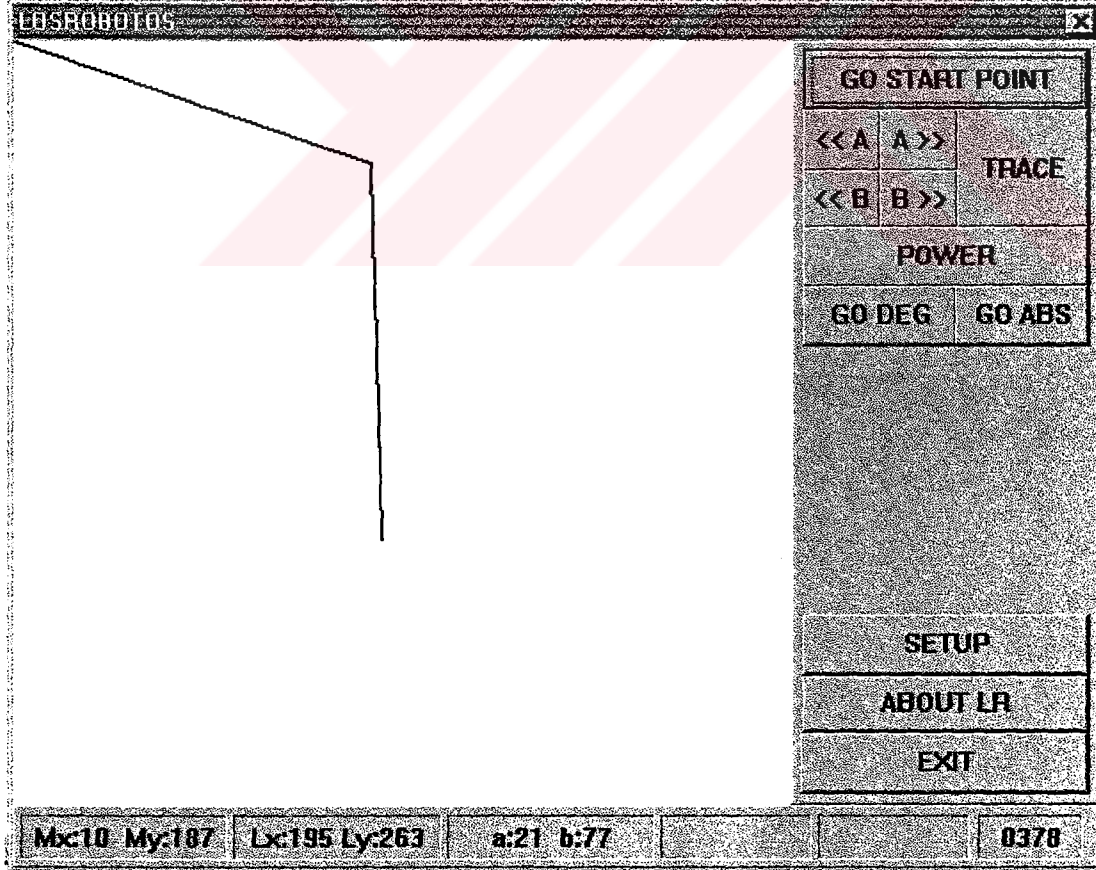
7.1.Giriş

Plotterin kontrol programı yazılırken hem estetik açıdan güzel görünmesi, hem de her bilgisayarda denenebilecek bir program olması açısından derleyici olarak DELPHI 3.0 kullanılmıştır. Bir başka sebepte programcılığın son yıllarda WINDOWS ortamına doğru yönelmeye başlamasıdır. Programın yazımı sırasında 800x600 çözünürlükte ekran modu kullanıldığı için çalışma sırasında da bu modun kullanılması tavsiye edilir.

7.2. Kontrol Programı Menüleri

7.2.1. Kontrol menüsü

Program çalıştırıldığında pencerenin sağ tarafında kontrol paneli, sol tarafında, robotun segmentlerini gösteren iki çizgi ve alt tarafta da durum bilgilerini içeren satır görünür.



Şekil 7.1. Kontrol panel menüsü

7.2.2. [GO START POINT]

Bu düğmeye basılınca robotun segmentlerini simgeleyen çizgilerin pencerenin üst sınırına bitişik hale geldikleri görülür. Bu konum başlangıç noktası olarak adlandırılmıştır. Segmentler herhangi bir yerde ya da açıda iken bu düğmeye basıldığında hep aynı başlangıç konumuna gidilir.

7.2.3. [<< A]

Fareyle bu düğmeye basıldığında robotun iki segmenti birden saat yönünde döner.

7.2.4. [A >>]

Fareyle bu düğmeye basıldığında robotun iki segmenti birden saat yönünün aksi istikamette döner.

7.2.5. [<< B]

Fareyle bu düğmeye basıldığında robotun sadece uç segmenti saat yönünde döner.

7.2.6. [B >>]

Fareyle bu düğmeye basıldığında robotun sadece uç segmenti saat yönünün aksi istikamette döner.

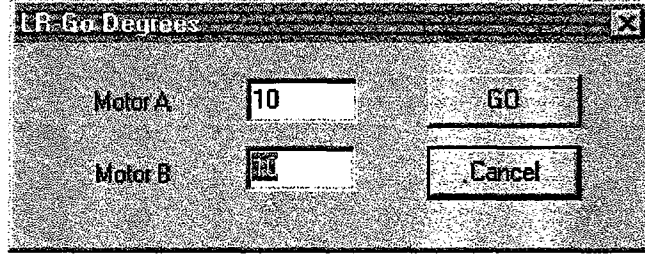
7.2.7. [TRACE]

Robot ekranda hareket ederken uç kısmının iz bırakması için kullanılır. Bu düğmeye basıldığında pencerenin alt kısmında "Tracing" yazısı çıkar. Tracing yazarken tüm hareketler çizilecektir. TRACE butonuna tekrar basılınca çizme işlemi durdurulur. Pencerenin alt tarafındaki durum çubuğunda "Tracing" yazısı kaybolur.

7.2.8. [POWER]

Program ilk açıldığında sürücü devrenin enerjisi kesilir. Yani ekranda yapılan hareket robota yansımaz. Bu düğmeye basılınca pencerenin alt kısmındaki durum çubuğunda "Power" yazısı çıkar. Bu yazı kaldığı sürece ekranda yapılan tüm hareketler robota da yansıtacaktır. Düğmeye tekrar basılırsa "Power" yazısı kaybolur.

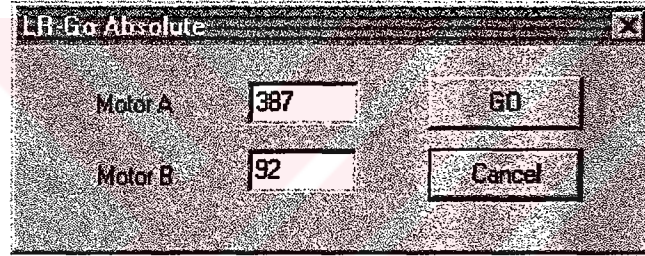
7.2.9. [GO DEG]



Şekil 7.2. Motor hareket açıları ile konumlandırma menüsü

Motor açılarını vererek plotter'ı konumlandırmamızı sağlar. Bu düğmeye basıldığında ekrana o anki motor açılarını gösteren ve değiştirebileceğimiz bir kutu gelir. Açılar yazılıp [GO] düğmesine basılınca kutu kaybolur ve motorlar yazılan açı değerlerine konumlanır.

7.2.10. [GO ABS]



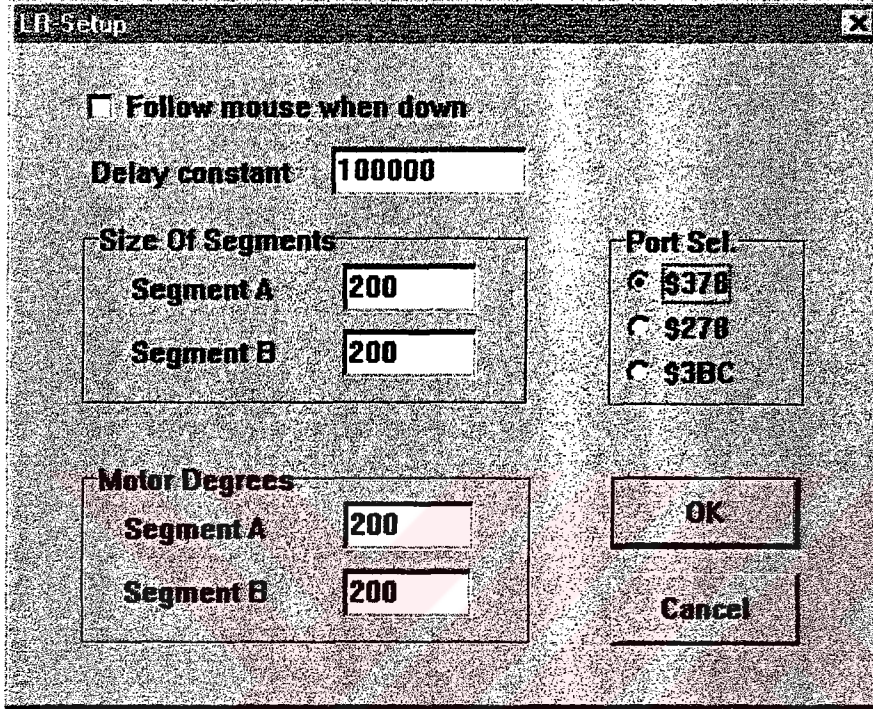
Şekil 7.3. Motorların herhangi bir koordinata konumlandırma menüsü

Tabla üzerinde bildiğimiz bir (x,y) noktasına konumlanmamızı sağlar. Bu düğmeye basıldığında ekrana o anki (x,y) koordinatlarını gösteren ve değiştirebileceğimiz bir kutu gelir. x ve y değerleri yazılıp [GO] düğmesine basılınca kutu kaybolur ve robotun uç kısmı istenilen (x,y) noktasına konumlanır.

7.2.11.[SETUP]

Program, bu türden her robotu kontrol edebilmek için, motor çözünürlükleri ve segment boyları değiştirilebilecek şekilde yazılmıştır. Setup kısmından bunlar değiştirilebilir. Programın normal çalışması sırasında beyaz renkli kısımlarda fareyi gezdirdiğimizde ok işaretinin ele dönüştüğü görülecektir. El işaretini gördüğümüz noktalarda farenin sol tuşuna basarsak robot o noktaya konumlanır. Robotun erişemeyeceği noktalarda stop işareti çıkar. Bu sırada ekranın alt kısmından farenin ve robotun uç kısmının koordinatlarını ve motor açılarını görebiliriz. Setup kutusundaki ilk onay kutusu

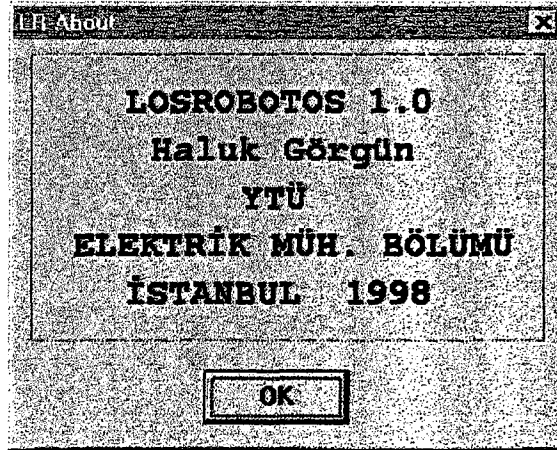
işaretlendiğinde, tablayı simgeleyen beyaz renkli kısımda farenin sol tuşunu basılı tuttuğumuzda robotta fareyi takip eder. Setup kutusundaki ikinci değerse motorların hızlarını vermek içindir.



Şekil 7.4. Setup Menüü

7.2.12.[ABOUT]

Programın yazar ve versiyon bilgilerini verir.



Şekil 7.5. Program yazarı ve versiyonu menüsü

7.2.13.[EXIT]

Programdan çıkmamızı sağlar.

7.3. Durum Satırındaki Değerler

Mx:154	My:306	Lx:400	Ly:0	a:0	b:0	Tracing	Power	0378
--------	--------	--------	------	-----	-----	---------	-------	------

Şekil 7.6. Durum değerleri menüsü

Mx My : Farenin tabla üzerindeki koordinatlarını verir. Pencerenin sol üst köşesinin koordinatları (0,0) olarak alınmıştır. Aşağı doğru gidildikçe My değeri sağa doğru gidildikçe Mx değeri artar.

Lx Ly : Robotun uç kısmının tabla üzerindeki koordinatlarını verir. Lx ve Ly , Mx ve My değerlerine benzer şekilde artar ve azalır. Burada dikkat edilmesi gereken bir nokta şudur: Motor çözünürlüklerinin varsayılan değerleri olarak 1.8 derece alınmıştır. Bu yüzden fareyle, robotun erişebileceği herhangi bir noktaya tıkladığımızda robotun tam olarak o noktaya değil de birkaç piksel yakınına geldiği görürüz. Motor çözünürlükleri setup kısmından artırıldığı takdirde tam olarak aynı noktaya gitmemiz mümkündür ama pratikteki durum göz önüne alınırsa yani robot kolunun motorlarının çözünürlüğünün 1.8 derece olduğu düşünülürse ayarlar bu şekilde bırakılmalıdır.

a b : Motorların o anki açılarını gösterir. a robotun tablaya bağlı olan motorunu b de uç segmenti döndüren motoru göstermektedir.

Tracing : Robotun uç kısmının iz bıraktığını gösterir.

Power : Ekranda yapılan hareketlerin robota yansıdığı durumlarda bu yazı çıkar.

0378 : Bilgisayarın üzerinde hangi port' un robota bağlı olduğunu gösterir.

8.YAPILAN UYGULAMANIN YAZILIMI

8.1. Delphi Project

```
program Lr;

uses
  Forms,
  Main in 'MAIN.PAS'    {MainForm},
  About in 'ABOUT.PAS' {AboutBox},
  Stp in 'STP.PAS'     {SetupDlg},
  CooRead in 'CooRead.pas' {CoReader};

{$R *.RES}

begin
  Application.CreateForm(TMainForm, MainForm);
  Application.CreateForm(TAboutBox, AboutBox);
  Application.CreateForm(TSetupDlg, SetupDlg);
  Application.CreateForm(TCoReader, CoReader);
  Application.Run;
end.
```

8.2 Main.Pas

```
unit Main;

interface

uses
  SysUtils, WinTypes, WinProcs, Messages, Classes, Graphics, Controls,
  Forms, Dialogs, StdCtrls, Buttons, ExtCtrls, Spin, About, Stp, CooRead;
```

type

TMainForm = class(TForm)

StatusLine : TPanel;

ControlPanel : TPanel;

XYIndicator : TPanel;

DegIndicator : TPanel;

TraceIndicator : TPanel;

PowerIndicator : TPanel;

PortIndicator : TPanel;

ResetButon : TButton;

IncDegAButon : TButton;

DecDegAButon : TButton;

IncDegBButon : TButton;

DecDegBButon : TButton;

TraceButon : TButton;

PowerButon : TButton;

ExitButon : TButton;

AboutButon : TButton;

SetupButon : TButton;

Timer1 : TTimer;

GoDegButon : TButton;

MXYIndicator : TPanel;

GoAbsButon : TButton;

procedure FormShow(Sender: TObject);

procedure ExitButonClick(Sender: TObject);

procedure AboutButonClick(Sender: TObject);

procedure SetupButonClick(Sender: TObject);

procedure TraceButonClick(Sender: TObject);

procedure PowerButonClick(Sender: TObject);

procedure FormPaint(Sender: TObject);

procedure Timer1Timer(Sender: TObject);

```

procedure ButonMouseUp(Sender: TObject; Button: TMouseButton;
Shift: TShiftState; X, Y: Integer);
procedure IncDegAButonMouseDown(Sender: TObject; Button: TMouseButton;
Shift: TShiftState; X, Y: Integer);
procedure DecDegAButonMouseDown(Sender: TObject; Button: TMouseButton;
Shift: TShiftState; X, Y: Integer);
procedure IncDegBButonMouseDown(Sender: TObject; Button: TMouseButton;
Shift: TShiftState; X, Y: Integer);
procedure DecDegBButonMouseDown(Sender: TObject; Button: TMouseButton;
Shift: TShiftState; X, Y: Integer);
procedure FormMouseMove(Sender: TObject; Shift: TShiftState; X,
Y: Integer);
procedure FormMouseDown(Sender: TObject; Button: TMouseButton;
Shift: TShiftState; X, Y: Integer);
procedure FormMouseUp(Sender: TObject; Button: TMouseButton;
Shift: TShiftState; X, Y: Integer);
procedure GoDegButonClick(Sender: TObject);
procedure GoAbsButonClick(Sender: TObject);
procedure ResetButonClick(Sender: TObject);
private
{ Private declarations }
public
{ Public declarations }
end;

var
MainForm: TMainForm;
Implementation
{$R *.DFM}

```

type

TButon = (IncDegA,DecDegA,IncDegB,DecDegB);

const

ASegDeg : integer = 10;

BSegDeg : integer = 10;

Tracing : boolean = False;

OnPower : boolean = False;

ButonBasili : boolean = False;

MouseDn : boolean = False;

PortArrange : array[1..8] of byte = (1,3,2,6,4,12,8,9);

SegAInd : byte = 1;

SegBInd : byte = 1;

var

OldASegDeg,OldBSegDeg : integer;

Orijin : TPoint;

BasiliButon : TButon;

function StrLF(L:longint;F:byte):string;

var

S : string;

begin

Str(L:F,S);

StrLF := S;

end;

function HexByte(Sayi : byte):string;

const

HexRakam : array[0..15] of char =

'0123456789ABCDEF';

```

begin
    HexByte := HexRakam[Sayi shr 4] + HexRakam[Sayi and 15];
end;

function HexWord(Sayi : word):string;
begin
    HexWord := HexByte(Sayi shr 8) + HexByte(Sayi and 255);
end;

procedure CalcXY(A,B: integer;var X,Y:integer);
var
    XA,YA : integer;
begin
    XA:=Orijin.X+Trunc(Setup.SegASize*cos((Pi*A)/Setup.SegARes));
    YA:=Orijin.Y+Trunc(Setup.SegASize*sin((Pi*A)/Setup.SegARes));
    X :=XA+Trunc(Setup.SegBSize*cos((Pi*A/Setup.SegARes)+(Pi*B/Setup.SegBRes)));
    Y :=YA+Trunc(Setup.SegBSize*sin((Pi*A/Setup.SegARes)+(Pi*B/Setup.SegBRes)));
end;

function CalcPortArrange:byte;
begin
    CalcPortArrange := PortArrange[SegAInd] or (PortArrange[SegBInd] shl 4);
end;

procedure Out32;stdcall;
var
    ByteValue : Byte;
    PortAdres : smallint;
begin
    PortAdres := Setup.PortAdres;
    ByteValue := CalcPortArrange;
    asm

```

```
    push dx
    mov dx, PortAdres
    mov al,ByteValue
    out dx,al
    pop dx
end;
end;
```

```
procedure PortBosalt; assembler;
asm
    push dx
    mov dx,Setup.PortAdres
    xor ax,ax
    out dx,al
    pop dx
end;
```

```
procedure NOP;
begin
end;
```

```
procedure Delay(Dly: longint);
var
    I : longint;
begin
    for I := 0 to Dly do NOP;
end;
```

```
procedure LRGO(A,B: integer);
var
    AArti,BArti : boolean;
```

```
begin
  AArti := A > 0;
  BArti := B > 0;
  A := Abs(A);
  B := Abs(B);
  while A <> 0 do
begin
  if AArti then
begin
  Inc(SegAInd);
  if SegAInd > 8 then SegAInd := 1;
end
else
begin
  Dec(SegAInd);
  if SegAInd < 1 then SegAInd := 8;
end;
  Out32;
  Delay(Setup.DelayConst);
  Dec(A);
end;
  while B <> 0 do
begin
  if BArti then
begin
  Inc(SegBInd);
  if SegBInd > 8 then SegBInd := 1;
end
else
begin
  Dec(SegBInd);
  if SegBInd < 1 then SegBInd := 8;
```

```

end;
    Out32;
    Delay(Setup.DelayConst);
    Dec(B);
end;
end;

procedure DrawRobot;
var
    XA, YA    : integer;
    XB, YB    : integer;
    OldMode   : TPenMode;
    OldX, OldY : integer;
begin
    if OnPower then LRGO(ASegDeg-OldASegDeg, BSegDeg-OldBSegDeg);
    OldMode := MainForm.Canvas.Pen.Mode;
    MainForm.Canvas.Pen.Mode := pmNotXor;
    XA := Orijin.X+Trunc(Setup.SegASize * cos((Pi*OldASegDeg)/Setup.SegARes));
    YA := Orijin.Y+Trunc(Setup.SegASize * sin((Pi*OldASegDeg)/Setup.SegARes));
    XB := XA + Trunc(Setup.SegBSize * cos((Pi*OldASegDeg/Setup.SegARes)
        +(Pi*OldBSegDeg/Setup.SegBRes)));
    YB := YA + Trunc(Setup.SegBSize * sin((Pi*OldASegDeg/Setup.SegARes)
        +(Pi*OldBSegDeg/Setup.SegBRes)));
    MainForm.Canvas.MoveTo(Orijin.X, Orijin.Y);
    MainForm.Canvas.LineTo(XA, YA);
    MainForm.Canvas.LineTo(XB, YB);
    OldX := XB;
    OldY := YB;
    XA := Orijin.X+Trunc(Setup.SegASize * cos((Pi*ASegDeg)/Setup.SegARes));
    YA := Orijin.Y+Trunc(Setup.SegASize * sin((Pi*ASegDeg)/Setup.SegARes));
    XB := XA + Trunc(Setup.SegBSize * cos((Pi*ASegDeg/Setup.SegARes)
        +(Pi*BSegDeg/Setup.SegBRes)));

```

```

YB := YA + Trunc(Setup.SegBSize * sin((Pi*ASegDeg/Setup.SegARes)
+(Pi*BSegDeg/Setup.SegBRes)));
MainForm.Canvas.MoveTo(Orijin.X,Orijin.Y);
MainForm.Canvas.LineTo(XA,YA);
MainForm.Canvas.LineTo(XB,YB);
MainForm.XYIndicator.Caption := 'Lx:' + IntToStr(XB) + ' Ly:' + IntToStr(YB);
MainForm.DegIndicator.Caption := 'a:' + IntToStr(ASegDeg) +
b:' + IntToStr(BSegDeg);
MainForm.Canvas.Pen.Mode := OldMode;
if Tracing then
begin
  OldMode := MainForm.Canvas.Pen.Mode;
  MainForm.Canvas.Pen.Mode := pmBlack;
  MainForm.Canvas.MoveTo(OldX,OldY);
  MainForm.Canvas.LineTo(XB,YB);
  MainForm.Canvas.Pen.Mode := OldMode;
end;
end;

procedure InitLR;
var
  XA,YA,XB,YB : integer;
begin
  XA := Orijin.X+Trunc(Setup.SegASize * cos((Pi*ASegDeg)/Setup.SegARes));
  YA := Orijin.Y+Trunc(Setup.SegASize * sin((Pi*ASegDeg)/Setup.SegARes));
  XB := XA+Trunc(Setup.SegBSize*cos((Pi*ASegDeg/Setup.SegARes)
+(Pi*BSegDeg/Setup.SegBRes)));
  YB := YA+Trunc(Setup.SegBSize*sin((Pi*ASegDeg/Setup.SegARes)
+(Pi*BSegDeg/Setup.SegBRes)));
  MainForm.Canvas.MoveTo(Orijin.X,Orijin.Y);
  MainForm.Canvas.LineTo(XA,YA);
  MainForm.Canvas.LineTo(XB,YB);

```

end;

```
procedure TMainForm.FormPaint(Sender: TObject);
```

```
begin
```

```
  InitLR;
```

```
end;
```

```
procedure TMainForm.FormShow(Sender: TObject);
```

```
var
```

```
  X,Y : integer;
```

```
begin
```

```
  OldASegDeg := ASegDeg;
```

```
  OldBSegDeg := BSegDeg;
```

```
  Canvas.Pen.Mode := pmNotXor;
```

```
  Width := 580;
```

```
  Height := 460;
```

```
  Orijin.X := 0;
```

```
  Orijin.Y := 0;
```

```
  CalcXY(ASegDeg,BSegDeg,X,Y);
```

```
  XYIndicator.Caption := 'Lx:'+IntToStr(X)+' Ly:'+IntToStr(Y);
```

```
  MXYIndicator.Caption := 'Mx:'+IntToStr(X)+' My:'+IntToStr(Y);
```

```
  DegIndicator.Caption := 'A:'+StrLF(ASegDeg,3)+' B:'+StrLF(BSegDeg,3) ;
```

```
  PortIndicator.Caption := HexWord(Setup.PortAdres);
```

```
  if Tracing then TraceIndicator.Caption := 'Tracing'
```

```
  else TraceIndicator.Caption := '';
```

```
  if OnPower then
```

```
begin
```

```
  Out32;
```

```
  PowerIndicator.Caption := 'Power';
```

```
end
```

```
  else
```

```
begin
    PortBosalt;
    PowerIndicator.Caption := "";
end;
end;

procedure TMainForm.ExitButonClick(Sender: TObject);
begin
    Close;
end;

procedure TMainForm.AboutButonClick(Sender: TObject);
begin
    AboutBox.ShowModal;
end;

procedure TMainForm.SetupButonClick(Sender: TObject);
begin
    SetupDlg.ShowModal;
    if SetupDlg.ModalResult = mrOk then
begin
        Hide;
        Show;
end;
end;

procedure TMainForm.TraceButonClick(Sender: TObject);
begin
    Tracing := not Tracing;
    if Tracing then TraceIndicator.Caption := 'Tracing'
    else TraceIndicator.Caption := "
end;
```

```
procedure TMainForm.PowerButonClick(Sender: TObject);
begin
    OnPower := not OnPower;
    if OnPower then
    begin
        Out32;
        PowerIndicator.Caption := 'Power';
    end
    else
    begin
        PortBosalt;
        PowerIndicator.Caption := "";
    end;
end;

procedure TMainForm.Timer1Timer(Sender: TObject);
begin
    if ButonBasili then
    begin
        OldASegDeg := ASegDeg;
        OldBSegDeg := BSegDeg;
        case BasiliButon of
            IncDegA : Inc(ASegDeg);
            DecDegA : Dec(ASegDeg);
            IncDegB : Inc(BSegDeg);
            DecDegB : Dec(BSegDeg);
        end;
        DrawRobot;
    end;
end;
```

```
procedure TMainForm.ButonMouseUp(Sender: TObject;  
Button: TMouseButton; Shift: TShiftState; X, Y: Integer);  
begin  
    ButonBasili := False;  
end;
```

```
procedure TMainForm.IncDegAButonMouseDown(Sender: TObject;  
Button: TMouseButton; Shift: TShiftState; X, Y: Integer);  
begin  
    ButonBasili := True;  
    BasiliButon := IncDegA;  
end;
```

```
procedure TMainForm.DecDegAButonMouseDown(Sender: TObject;  
Button: TMouseButton; Shift: TShiftState; X, Y: Integer);  
begin  
    ButonBasili := True;  
    BasiliButon := DecDegA;  
end;
```

```
procedure TMainForm.IncDegBButonMouseDown(Sender: TObject;  
Button: TMouseButton; Shift: TShiftState; X, Y: Integer);  
begin  
    ButonBasili := True;  
    BasiliButon := IncDegB;  
end;
```

```
procedure TMainForm.DecDegBButonMouseDown(Sender: TObject;  
Button: TMouseButton; Shift: TShiftState; X, Y: Integer);  
begin  
    ButonBasili := True;  
    BasiliButon := DecDegB;
```

end;

```
procedure TMainForm.FormMouseMove(Sender: TObject; Shift: TShiftState; X,
Y: Integer);
```

```
var
```

```
  CosB, SinB : real;
```

```
  R      : real;
```

```
begin
```

```
  MXYIndicator.Caption := 'Mx:'+IntToStr(X)+' My:'+IntToStr(Y);
```

```
  if ((Sqr(X)+Sqr(Y))>Sqr(Setup.SegASize+Setup.SegBSize))
```

```
  or (X<=0)
```

```
  or (Y<=0) then
```

```
    Cursor := crNo else Cursor := crHandPoint;
```

```
  if Setup.FollowCursor then
```

```
    if MouseDn then
```

```
      if Cursor <> crNo then
```

```
begin
```

```
  OldASegDeg := ASegDeg;
```

```
  OldBSegDeg := BSegDeg;
```

```
  CosB := (Sqr(X)+Sqr(Y)-Sqr(Setup.SegASize)-Sqr(Setup.SegBSize))
```

```
  /(2.0*Setup.SegASize*Setup.SegBSize);
```

```
  SinB := Sqrt(1.0-Sqr(CosB));
```

```
  BSegDeg := Trunc((ArcTan(SinB/CosB)*Setup.SegBRes)/Pi);
```

```
  if BSegDeg < 0 then BSegDeg := BSegDeg+Setup.SegBRes;
```

```
  R:=ArcTan(Y/X);
```

```
  R:=RArcTan((Setup.SegBSize*SinB)/(Setup.SegASize+(Setup.SegBSize*CosB)));
```

```
  ASegDeg := Trunc((R*Setup.SegARes)/Pi);
```

```
  DrawRobot;
```

```
end;
```

```
end;
```

```

procedure TMainForm.FormMouseDown(Sender: TObject; Button:
TMouseButton;

Shift: TShiftState; X, Y: Integer);
var
  CosB, SinB : real;
  R : real;
begin
  MouseDn := True;
  if Cursor = crNo then Exit;
  OldASegDeg := ASegDeg;
  OldBSegDeg := BSegDeg;
  CosB := (Sqr(X)+Sqr(Y)-Sqr(Setup.SegASize)-Sqr(Setup.SegBSize))
/(2.0*Setup.SegASize*Setup.SegBSize);
  SinB := Sqrt(1.0-Sqr(CosB));
  BSegDeg := Trunc((ArcTan(SinB/CosB)*Setup.SegBRes)/Pi);
  if BSegDeg < 0 then BSegDeg := BSegDeg+Setup.SegBRes;
  R := ArcTan(Y/X);
  R := R-ArcTan((Setup.SegBSize*SinB)/(Setup.SegASize+(Setup.SegBSize*CosB)));
  ASegDeg := Trunc((R*Setup.SegARes)/Pi);
  DrawRobot;
end;

procedure TMainForm.FormMouseUp(Sender: TObject; Button: TMouseButton;
Shift: TShiftState; X, Y: Integer);
begin
  MouseDn := False;
end;

procedure TMainForm.GoDegButonClick(Sender: TObject);
begin
  CoReader.Caption := 'LR-Go Degrees';

```

```

CoReader.Edit1.Text := IntToStr(ASegDeg);
CoReader.Edit2.Text := IntToStr(BSegDeg);
CoReader.Label1.Caption := 'Motor A';
CoReader.Label2.Caption := 'Motor B';
CoReader.ShowModal;
if CoReader.ModalResult = mrOk then
begin
  OldASegDeg := ASegDeg;
  OldBSegDeg := BSegDeg;
  ASegDeg := StrToInt(CoReader.Edit1.Text);
  BSegDeg := StrToInt(CoReader.Edit2.Text);
  DrawRobot;
end;
end;

procedure TMainForm.GoAbsButonClick(Sender: TObject);
var
  X,Y : integer;
  CosB,SinB : real;
  R : real;
begin
  CalcXY(ASegDeg,BSegDeg,X,Y);
  CoReader.Caption := 'LR-Go Absolute';
  CoReader.Edit1.Text := IntToStr(X);
  CoReader.Edit2.Text := IntToStr(Y);
  CoReader.Label1.Caption := 'Motor A';
  CoReader.Label2.Caption := 'Motor B';
  CoReader.ShowModal;
  if CoReader.ModalResult = mrOk then
begin
  X := StrToInt(CoReader.Edit1.Text);
  Y := StrToInt(CoReader.Edit2.Text);

```

```

OldASegDeg := ASegDeg;
OldBSegDeg := BSegDeg;
CosB := (Sqr(X)+Sqr(Y)-Sqr(Setup.SegASize)-Sqr(Setup.SegBSize))
/(2.0*Setup.SegASize*Setup.SegBSize);
SinB := Sqrt(1.0-Sqr(CosB));
BSegDeg := Trunc((ArcTan(SinB/CosB)*Setup.SegBRes)/Pi);
if BSegDeg < 0 then BSegDeg := BSegDeg+Setup.SegBRes;
R := ArcTan(Y/X);
R := R-ArcTan((Setup.SegBSize*SinB)/(Setup.SegASize+(Setup.SegBSize*CosB)));
ASegDeg := Trunc((R*Setup.SegARes)/Pi);
  DrawRobot;
end;
end;

procedure TMainForm.ResetButonClick(Sender: TObject);
begin
  OldASegDeg := ASegDeg;
  OldBSegDeg := BSegDeg;
  ASegDeg := 0;
  BSegDeg := 0;
  DrawRobot;
end;

end.

```

8.2.1 About.Pas

```
unit About;
```

```
interface
```

```
uses WinTypes, WinProcs, Classes, Graphics, Forms, Controls, StdCtrls,
```

```
Buttons, ExtCtrls;

type
  TAboutBox = class(TForm)
    Panel1: TPanel;
    Label1: TLabel;
    Label2: TLabel;
    Label3: TLabel;
    Label4: TLabel;
    Button1: TButton;
    procedure OKButtonClick(Sender: TObject);
    procedure Button1Click(Sender: TObject);
  private
    { Private declarations }
  public
    { Public declarations }
end;

var
  AboutBox: TAboutBox;

implementation

uses Main, Stp;

{$R *.DFM}

procedure TAboutBox.OKButtonClick(Sender: TObject);
begin
  Close
end;
```

```
procedure TAboutBox.Button1Click(Sender: TObject);
```

```
begin
```

```
    Close;
```

```
end;
```

```
end.
```

8.2.2. CooRead.Pas

```
unit CooRead;
```

```
    interface
```

```
    uses
```

```
    Windows, Messages, SysUtils, Classes, Graphics, Controls, Forms, Dialogs,  
    StdCtrls;
```

```
    type
```

```
    TCoReader = class(TForm)
```

```
    Edit2: TEdit;
```

```
    Edit1: TEdit;
```

```
    GoButon: TButton;
```

```
    CancelButon: TButton;
```

```
    Label1: TLabel;
```

```
    Label2: TLabel;
```

```
    private
```

```
    { Private declarations }
```

```
    public
```

```
    { Public declarations }
```

```
end;
```

```
var
    CoReader: TCoReader;

implementation

    {$R *.DFM}
end.
```

8.2.3. Stp.Pas

```
unit Stp;

interface

uses
    SysUtils, WinTypes, WinProcs, Messages, Classes, Graphics, Controls,
    Forms, Dialogs, StdCtrls, ExtCtrls;

type
    TSetupDlg = class(TForm)
        PortStp: TRadioGroup;
        SegSize: TGroupBox;
        Label1: TLabel;
        Label2: TLabel;
        Edit1: TEdit;
        Edit2: TEdit;
        SegRes: TGroupBox;
        Label3: TLabel;
        Label4: TLabel;
        Edit3: TEdit;
        Edit4: TEdit;
```

```

FollowCheckBox: TCheckBox;
Button1: TButton;
Button2: TButton;
Edit5: TEdit;
Label5: TLabel;
procedure FormShow(Sender: TObject);
procedure Button1Click(Sender: TObject);
private
{ Private declarations }
public
{ Public declarations }
end;

```

```

type
TSetup = record
PortAdres    : word;
SegASize    : integer;
SegBSize    : integer;
SegARes     : integer;
SegBRes     : integer;
FollowCursor : boolean;
DelayConst  : longint;
end;

```

```

const
Setup : TSetup = (PortAdres    : $378;
SegASize    : 200;
SegBSize    : 200;
SegARes     : 200;
SegBRes     : 200;
FollowCursor : False;
DelayConst  : 100000);

```

```
var
    SetupDlg: TSetupDlg;

implementation

    {$R *.DFM}

    procedure TSetupDlg.FormShow(Sender: TObject);
begin
    Edit1.Text := IntToStr(Setup.SegASize);
    Edit2.Text := IntToStr(Setup.SegBSize);
    Edit3.Text := IntToStr(Setup.SegARes);
    Edit4.Text := IntToStr(Setup.SegBRes);
    Edit5.Text := IntToStr(Setup.DelayConst);
    case Setup.PortAdres of
        $378 : PortStp.ItemIndex := 0;
        $278 : PortStp.ItemIndex := 1;
        $3BC : PortStp.ItemIndex := 2;
    end;
    FollowCheckBox.Checked := Setup.FollowCursor;
end;

    procedure TSetupDlg.Button1Click(Sender: TObject);
begin
    Setup.SegASize := StrToInt(Edit1.Text);
    Setup.SegBSize := StrToInt(Edit2.Text);
    Setup.SegARes := StrToInt(Edit3.Text);
    Setup.SegBRes := StrToInt(Edit4.Text);
    Setup.DelayConst := StrToInt(Edit5.Text);
    case PortStp.ItemIndex of
```

0 : Setup.PortAdres := \$378;

1 : Setup.PortAdres := \$278;

2 : Setup.PortAdres := \$3BC;

end;

Setup.FollowCursor := FollowCheckBox.Checked;

end;

end.



9. SONUÇLAR

Bir step motoru çalıştırırken göz önüne alınması gereken en önemli noktalar, motorun çalışma sistemi ve kontrol için hazırlanan yazılımdır. Motor karakteristiğinde çalışma sisteminin önemi büyüktür. Örneğin, eğer yük, ve hız sabit ve hız motorun kalkış/duruş hızı sınırları içinde ise sabit d.c. güç kaynaklı tek kutuplu çalışma sistemi kullanılmalıdır. Kontrol olarak yoğun yazılım bilgi işlemci kontrolü kullanılacak ise kontrol programı kısaltılmalıdır. Bu da daha geniş hız sınırları içerisinde daha güvenli zamanlama sağlar. Hatta bazı uygulamalarda dışarıdan clock timer chip kullanılırsa hızlanma ve yavaşlamalar daha lineer olması ve gecikmeler önlenmiş olmasının yanında yazılım da kısalmış olur.

Etkin konumlama gerektiren uygulamalarda adım cevabı çok önemlidir. Ayrıca step motora uygulanan ilk adım darbesinden sonra ikinci darbe verilmeden motorun kararlı hale gelmesi gerekmektedir. Mikrocomputer veya bilgi işlemci yardımıyla açılış, kapanış döndürme, çevirme ve etkin bir şekilde konumlandırma gerektiren uygulamalarda bu çok önemli bir durumdur.

Hazırlanan tezin 6. Bölümünde açıklanan dönüşüm formülleri bu çalışmanın ve buna benzer uygulamaların en önemli kısmını teşkil etmektedir. Şimdiye kadar yapılan XY yazıcı uygulamaları lineer çalışmaya göre yapılmıştı. Bu çalışmada plotter uygulaması gerçekleştirilirken plotterin rotasyonel hareket yapması sağlandı. Böylece insan vücudu hareketlerine benzer bir çalışma yapılmış oldu. Özet bölümünde de belirtildiği gibi yapılan çalışma robot uygulamalarının temelini oluşturmakla beraber geliştirilmesi ve endüstriyel olarak uygulamaya sokulması mümkündür.

Çalışmada mekanik hareketi sağlayan step motorlar yerine fırçasız doğru akım motorları da kullanılarak sistemin hızı, çözünürlüğü ve momenti arttırılabildi. Fakat fırçasız doğru akım motorlarının sıraladığımız bu güzel özelliklerinin yanında kontrolünün zor ve karmaşık olması bu tür uygulamalarda step motor kullanılmasını cazip hale getiriyor. Kaldı ki bu özelliklerin bir kısmı step motor miline redüksiyon düzeneğinin kurulması ile bu motorlara da kazandırılabilir. Bu da sistemin maliyetini oldukça düşürür.

KAYNAKLAR

AustinHughes, 1993, "ELECTRIC MOTORS AND DRIVES",
Newnes.: p.p.257,290

Denis O'Kelly, 1991, "PERFORMANCE AND CONTROL OF ELECTRICAL
MACHINES", Cambridge University press.:p.p.285,310

Douglas W. Jones, "Stepping Motor Control Software", Internet Adres;
<http://dvt07.fagmed.uit.no/fag/step/software.html>

Douglas W.Jones, "A Worked Stepping Motor Example", Internet Adres;
<http://dvt07.fagmed.uit.no/fag/step/circuits.html>

Muhammad H. RASHID, 1993, "POWER ELECTRONICS CIRCUITS, DEVICES AND
APPLICATIONS", Prentice Hall Int. Ed.:p.p.477,493

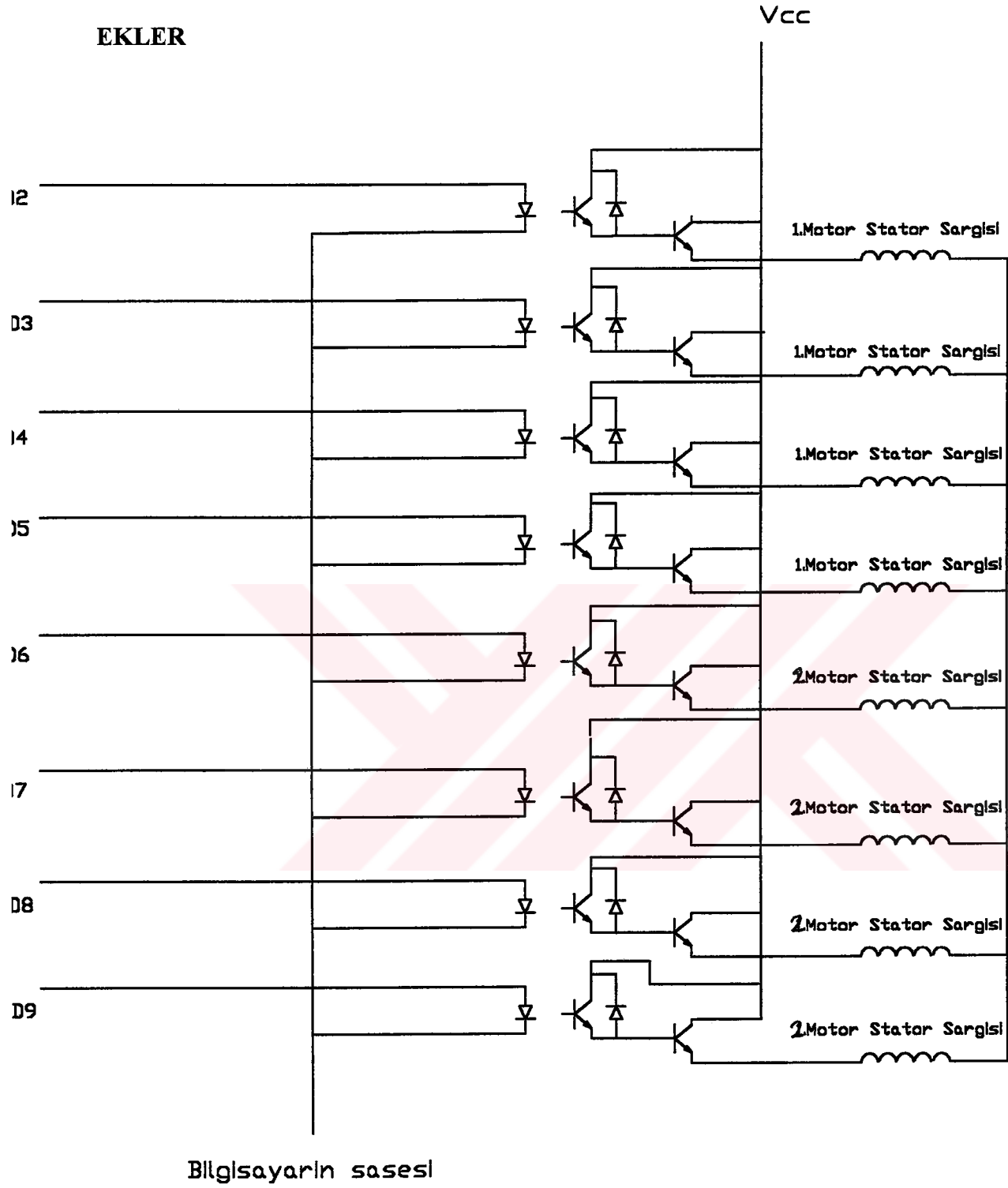
Prof.Y.Müh. Adnan ERGENELİ, 1988, "ELEKTROMAGNETİK ALANTEORİSİ II.
KİTAP", p.p.69-71

Takashi KENJO, 1983, "STEPPING MOTORS AND THEIR MICROPROCESSOR
CONTROL", Cambridge Pub.:p.p.1,87

Takashi KENJO, 1990, " POWER ELECTRONICS FOR THE MICROPROCESSOR
AGE", Oxford University Press : p.p.170,199

TECQUIPMENT User's Manual, 1995,
Tequipment Pub.:p.p.2-1, 2-28

EKLER



Ek. 1. Kullanılan sürücü devresi

ÖZGEÇMİŞ

Doğum tarihi	14. 11. 1973	
Doğum yeri	İstanbul	
Lise	1984-1990	Esenler İbrahim Turhan Lisesi
Lisans	1991-1995	Yıldız Teknik Üniversitesi Elektrik-Elektronik Fak. Elektrik Mühendisliği Bölümü
Yüksek Lisans	1995-1998	Yıldız Teknik Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Elektrik Mühendisliği Ana Bilim Dalı, Elektrik Mühendisliği Programı
Çalıştığı Kurum	1995-Devam	Y.T.Ü. Elektrik Müh. Bölümü Araştırma Görevlisi

YILDIZ TEKNİK ÜNİVERSİTESİ
ELEKTRİK-ELEKTRONİK FAKÜLTESİ
ELEKTRİK MÜHENDİSLİĞİ BÖLÜMÜ